دراسات عالمية



إدارة الوقود النووي المستنفد

الاستراتيجيات البديلة وانعكاساتها على السياسات

توم لا توريت، وتوماس لايت، وديبرا نوبمان، وجيمس بارتيس



مركز الإمارات للدراسات والبحوث الاستراتيجية

العدد 106

إدارة الوقود النووي المستنفد

الاستراتيجيات البديلة وانعكاساتها على السياسات

مركز الإمارات للدراسات والبحوث الاستراتيجية

أنشئ مركز الإمارات للدراسات والبحوث الاستراتيجية في أبوظبي بتاريخ 14 آذار/ مارس 1994؛ كمؤسسة بحثية مستقلة تعنى بدراسة القضايا الاستراتيجية السياسية والاقتصادية والاجتماعية والمعلوماتية، التي تهم دولة الإمارات العربية المتحدة ومنطقة الخليج العربي خصوصاً والعالم العربي عموماً، ومتابعة أهم المستجدات الإقليمية والدولية.

وفي إطار التفاعل الثقافي والتعاون العلمي، يصدر المركز سلسلة **دراسات عالمية** التي تعنى بترجمة أهم الدراسات والبحوث التي تنشر في دوريات عالمية مرموقة، وتتصل موضوعاتها باهتمامات المركز العلمية، كما تهتم بنشر البحوث والدراسات بأقلام مشاهير الكتاب ورجال السياسة. ويرحب المركز بتلقي البحوث والدراسات المترجمة، وفق قواعد النشر الخاصة بالسلسلة.

دراسات عالمية

إدارة الوقود النووي المستنفد

الاستراتيجيات البديلة وانعكاساتها على السياسات

توم لاتوريت، وتوماس لايت، وديبرا نويمان، وجيمس بارتيس

العدد 106

تصدر عن





محتوى الدراسة لا يعبر بالضـرورة عن وجهة نظر المركز

This is an authorized translation of *Managing Spent Nuclear Fuel: Strategy Alternatives and Policy Implications* by Tom LaTourrette, Thomas Light, Debra Knopman, James T. Bartis; and published by RAND Corporation (2010). The ECSSR is indebted to the authors and to the original publisher for permitting the translation, publication and distribution of this work under its name.

الطبعة الأولى 2012

ISSN 1682-1211

النسخـــة العاديـــة ISBN 978-9948-14-588-2

النسخة الإلكترونية ISBN 978-9948-14-589-9

توجه المراسلات باسم رئيس تحرير سلسلة **دراسات عالمية**

على العنوان الآتي:

مركز الإمارات للدراسات والبحوث الاستراتيجية

ص ب: 4567

أبوظبي، دولة الإمارات العربية المتحدة

هاتف: +9712-4044541

فاكس: +9712-4044542

E-mail: pubdis@ecssr.ae

Website: http://www.ecssr.ae

المحتويات

تمهيد

حول هذه الدراسة

تعد زيادة نسبة الطاقة النووية في مزيج تكنولوجيات توليد الطاقة الكهربائية، إحدى طرائق الحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، إلا أن من العقبات الرئيسية في وجه الاستثمار في محطات الطاقة النووية الجديدة في الولايات المتحدة الأمريكية، عدم اليقين بشأن مصير الوقود النووي المستنفد؛ فلكي تكون الطاقة النووية خياراً مستداماً بالنسبة إلى الولايات المتحدة، يجب تطبيق أساليب لإدارة الوقود النووي المستنفد، تحقق معايير صارمة للسلامة والمحافظة على البيئة. وهذه الدراسة تقوِّم الأساليب التقنية والعوامل المؤسسية والخيارات الاستراتيجية لإدارة الوقود النووي المستنفد، وتستخلص الآثار المترتبة على السياسات والمرتبطة بأولويات وقيم اجتماعية مختلفة.

شكّل وزير الطاقة الأمريكي في 29 كانون الثاني/ يناير 2010، لجنة خبراء تعرف باسم لجنة بلو ريبون Blue Ribbon Commission، بشأن المستقبل النووي للولايات المتحدة مهمتها تقديم التوصيات بخصوص إدارة الوقود النووي المستنفد والنفايات النووية الأخرى. ونحن نعتزم أن تقدم هذه الدراسة فائدة لأعضاء اللجنة وموظفيها وغيرهم من المعنيين بعملية وضع سياسات الوقود النووي المستنفد.

وهذه الدراسة هي من نتائج برنامج مؤسسة راند للاستثمار في الناس والأفكار. وقد تم دعم هذا البرنامج جزئياً اعتماداً على سخاء مانحي راند، ورسوم الأبحاث التي يمولها العملاء.

برنامج مؤسسة راند للبيئة والطاقة والتنمية الاقتصادية

أُجري هذا البحث في إطار برنامج البيئة والطاقة والتنمية الاقتصادية، وهو أحد برامج مؤسسة راند للبنية التحتية والسلامة والبيئة. وتُمثل مهمة برامج البنية التحتية والسلامة والبيئة بتحسين التطوير والتشغيل والاستخدام والحماية للأصول المادية والموارد

الطبيعية الأساسية للمجتمع وتعزيز الجوانب الاجتماعية ذات الصلة بذلك، وهي سلامة الأفراد وأمنهم في تنقلاتهم وأماكن عملهم وتجمعاتهم السكنية. وتعالج أبحاث البيئة والطاقة والتنمية الاقتصادية، نوعية البيئة وتنظيمها وموارد الطاقة وموارد المياه ونظم كل منهما والمناخ والمخاطر والكوارث الطبيعية والتنمية الاقتصادية، على المستويين المحلي والدولي. وتجرى هذه الأبحاث لمصلحة الحكومات والمؤسسات والقطاع الخاص.

ملخص

توفر الطاقة النووية بديلاً من الفحم والغاز الطبيعي في محطات توليد الطاقة الكهربائية، يسبب انبعاث قدر أقل بكثير من غازات الاحتباس الحراري؛ ولذلك فإن زيادة استخدام الطاقة النووية في توليد الكهرباء، هي إحدى الطرائق للحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. ولكن بينما توفر الطاقة النووية نحو 20٪ من إنتاج الكهرباء في الولايات المتحدة، فلم يبدأ العمل على بناء أي محطة للطاقة النووية منذ عام 1977. وإحدى العقبات الرئيسية في وجه زيادة استخدام الطاقة النووية، هي المأزق القائم منذ عقود طويلة حول كيفية التعامل والوقود النووي المستنفد.

كانت السياسة الوطنية لإدارة الوقود المستنفد حتى عام 2009، تسترشد بقانون سياسة النفايات النووية لسنة 1982 وتعديلاته، ووفق هذا القانون، يتوافر لشركات المرافق التي تنتج الوقود النووي المستنفد، خيار تسليم ذلك الوقود للحكومة الفيدرالية التي تتولى التخلص منه في نهاية المطاف، في مستودع جيولوجي دائم، يعزل الوقود المستنفد عن البيئة، إلى أن يصبح غير ذي خطر على الصحة أو السلامة. ويُلزِم القانون الحكومة الفيدرالية أن تكون جاهزة لتسلم الوقود المستنفد عام 1998؛ حيث من المفترض أن يكون المستودع مرخصاً، وجاهزاً لاستقبال الوقود المستنفد والنفايات الأخرى من النشاطات الدفاعية. وفي عام 1987، تم تعديل القانون ليلزم وزارة الطاقة الأمريكية بأن تقصر بحثها عن مكان مناسب لأول مستودع أمريكي على منطقة جبل يوكا في نيفادا، وعدم البحث في مواقع أخرى، وحُذفت المواد الخاصة باختيار موقع للمستودع الثاني من قانون عام 1982.

وحتى الآن، مازال الوقود التجاري المستنفد كله في محطات الطاقة النووية، ولم يتم بناء مستودع جبل يوكا أو ترخيصه، على الرغم من الجهود التي بُذلت على مدى أكثر من 20 عاماً. وقد رفعت دعاوى قضائية عدة ضد الحكومة الفيدرالية تطالب بالتعويض عن تكاليف تخزين الوقود المستنفد بعد الموعد النهائي المحدد بعام 1998. وفي عام 2009 ألغت إدارة أوباما تمويل مشروع جبل يوكا، ثم طلبت وزارة الطاقة، سحب طلب الرخصة الذي قدمته إلى هيئة تنظيم الطاقة النووية. ويشير توقف جهود بناء مستودع جبل

يوكا، إلى الحاجة إلى إجراء مراجعة رئيسية للسياسة. وفي كانون الثاني/ يناير عام 2010، أنشأ وزير الطاقة الأمريكي لجنة خبراء تعرف باسم لجنة بلو ريبون، بشأن المستقبل النووي للولايات المتحدة، مهمتها تقديم التوصيات بخصوص إدارة الوقود النووي المستنفد، والنفايات النووية الأخرى.

ولكي تصبح الطاقة النووية مستدامة ومقبولة لدى الرأي العام، يجب الاتفاق على حل لمشكلة الوقود النووي المستنفد، يحقق بشكل مقنع معايير السلامة والبيئة؛ فما البدائل لإدارة الوقود النووي المستنفد وتخزينه والتخلص منه بأمان؟ وكيف يمكن تصنيف هذه البدائل بشكل يسمح بفهم الآثار المترتبة على كل منها؟ وما انعكاساتها على السياسات؟

هناك إجماع دولي على عدم وجود أي تكنولوجيا حالية أو تصور لتكنولوجيا مستقبلية، يوفران إلغاء الحاجة إلى مستودع جيولوجي واحد أو أكثر للنويدات المشعة radionuclides، وهي التي تعمر طويلاً. ولكن ما من شيء يقتضي التخلص الفوري من هذه النويدات عبر مستودع جيولوجي دائم، وهناك خيارات تقنية تسمح بشراء الوقت؛ لإيجاد منهج تدريجي في بناء المستودع؛ وربما تغيير خصائص النفايات.

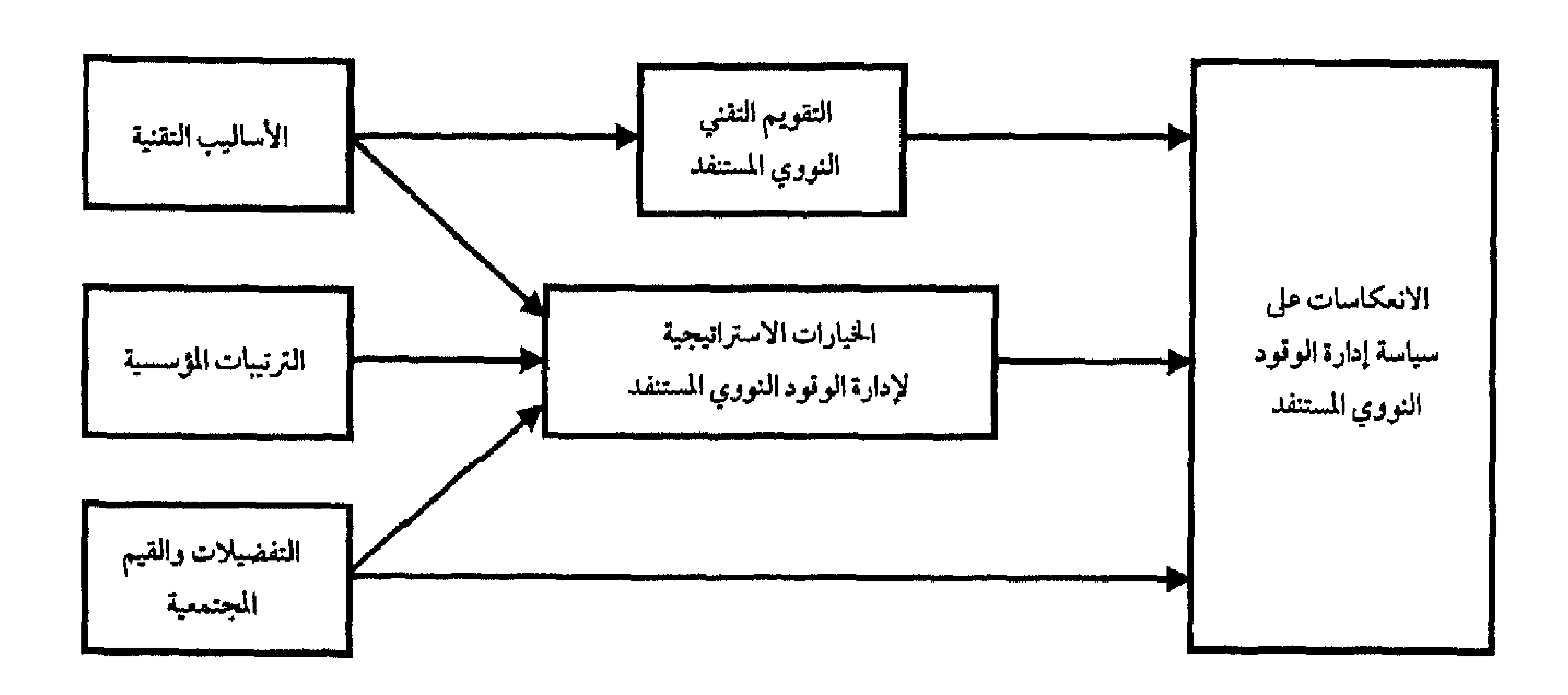
تهدف هذه الدراسة إلى استعراض الوضع الحالي للعناصر التقنية والمؤسسية الرئيسية في إدارة الوقود النووي المستنفد، وتحديد انعكاسات ذلك على صوغ السياسة الخاصة بتلك الإدارة. ونحن ندرس الانعكاسات على السياسة في سياق مجموعة من المناهج الاستراتيجية المحتملة. وبينما تشمل الاستراتيجيات المدروسة معظم الخيارات التي يتم النظر فيها حالياً، فإننا لا نقدم تقويماً شاملاً لجميع خيارات السياسة، ولا نحاول أن نوصي باتباع سياسة معينة؛ ونظراً إلى ضيق الوقت المتاح لهذا البحث، فقد اخترنا أن نركز على الوقود المستنفد التجاري حصراً، ولن نتطرق إلى موضوع التخلص من النفايات النووية الدفاعية.

يلخص الشكل (م-1) النهج المتبع في هذه الدراسة؛ فتحليل الأساليب التقنية الرئيسية والترتيبات المؤسسية المتعلقة بإدارة الوقود النووي المستنفد، إلى جانب النظر في التفضيلات المجتمعية، يقود إلى مجموعة من الخيارات الاستراتيجية؛ ثم تتم مقارنة

الخيارات الاستراتيجية، في سياق التقويم التقني والتفضيلات المجتمعية؛ لتوضيح انعكاسات ذلك على سياسة إدارة الوقود النووي المستنفد.

الشكل (م-1)

ملخص النهج التحليلي



الأساليب التقنية لإدارة الوقود النووي المستنفد

سنلقي نظرة إلى أربع فئات من الأساليب التقنية التي تشكل الأساليب الأساسية في أي استراتيجية طويلة المدى لإدارة الوقود النووي المستنفد:

- تقنيات التخزين السطحي في مواقع المحطات النووية الحالية (التخزين في الموقع).
- التخزين المركزي المؤقت في مكان بعيد عن مواقع المحطات.
- دورات الوقود المتقدمة مع إعادة تدوير الوقود المستنفد.
- التخلص الدائم في مستودع جيولوجي عميق.
- أي استراتيجية لإدارة الوقود النووي المستنفد، ستكون من مزيج من هذه الخيارات، وجميع الاستراتيجيات يجب أن تشمل – في نهاية المطاف – التخلص الجيولوجي الدائم.

ولفهم هذه الأساليب بشكل أفضل، سننظر إليها أولاً؛ بوصفها تكنولوجيات منفصلة عن بعضها بعضاً، وسنطبق خمسة معايير تشمل كثيراً من المخاوف الرئيسية المتعلقة بالطاقة النووية التي تظهر في المناقشات العامة والأدبيات الأكاديمية؛ وهي: السلامة، والأمن، والعقبات التقنية، وقبول الرأي العام، والتكلفة. وسنركز أولاً، على أثر هذه الأساليب خلال السنوات العشرين أو الثلاثين القادمة، ونلخص نتائج تقويمنا لكل أسلوب في الجدول (م-1). والتقويمات نوعية بالضرورة، وهناك شكوك كبيرة مرتبطة بها؛ والقصد من ذلك، هو التعرف إلى الفروق الرئيسية بين الأساليب، بحسب كل معيار عند النظر إلى كل واحدة منها وحدها، وبالمقارنة إلى التخلص من الوقود المستنفد أو مشتقاته بشكل نهائي في مستودع جيولوجي.

درسنا في حالة دورات الوقود المتقدمة أيضاً، التأثيرات المحتملة في متطلبات سعة المستودع الجيولوجي والمخاطر البيئية المرتبطة به والاحتياجات من موارد اليورانيوم.

الجدول (م-1)

تقويم الأساليب التقنية لإدارة الوقود النووي المستنفد

المعيار	استمرار التخزين في الموقع	التخزين المركزي المؤقت	دورة الوقود المتقدمة	التخلص الجيولوجي الدائم
المخاطر على السلامة	منخفضة	منخفضة	غير مؤكدة	منخفضة
المخاطر الأمنية	منخفضة	منخفضة	غير مؤكدة، يحتمل أن تكون منخفضة	منخفضة
العقبات التقنية	منخفضة	منخفضة	مرتفعة	متوسطة
تحديات القبول العام	متوسطة بشكل عام، ولكنها أعلى في المواقع التي جرى تفكيكها	قليلة قرب محطات الطاقة النووية، ولكن من المرجح أن تكون أكبر قرب مواقع التخزين المؤقت	كبيرة على مستوى الموقع المحدد ويرجح أن تكون كبيرة ما لم يتم حل موضوع التخلص الجيولوجي الدائم	كبيرة على مستوى الموقع المحدد، ولكن أقل بكثير على المستوى الوطني
التكلفة	منخفضة	منخفضة	مرتفعة	متوسطة

وقد خلص تحليلنا للأساليب التقنية إلى النتائج المهمة الآتية:

- ليس هناك حاجة ملحة – في معظم الحالات – إلى إزالة الوقود المستنفد من مواقع محطات الطاقة النووية؛ فالتخزين في الموقع آمن ومنخفض التكلفة ولا توجد عادة مشكلة في المساحة اللازمة. ويستثنى من ذلك "الوقود المتروك" في مواقع المفاعلات المفككة؛ حيث ستسمح إزالة الوقود المستنفد بإعادة تطوير الموقع.
- من المتوقع أن يكون التخزين المركزي المؤقت، بالمستوى نفسه، من حيث الأمان والسهولة التقنية والتكلفة المنخفضة.
- ماتزال تقنيات دورة الوقود المتقدمة في مراحلها البحثية الأولى، وسوف يتطلب تنفيذها عقوداً عدة من التمويل الكبير، قبل أن تصبح قابلة للتطبيق على نطاق تجاري.
- بعض عناصر دورة الوقود المتقدمة؛ قد يؤدي إلى تخفيض كبير في متطلبات سعة المستودع الجيولوجي (برغم أن هذا المكسب سيتقلص جزئياً؛ بسبب زيادة النفايات الناتجة من معالجة المواد المشعة)، ولكن لن تكون لها فائدة تذكر، من حيث تقليص مخاطر المستودع على السلامة والبيئة على المدى الطويل.
- من المرجح أن يتم التغلب على العقبات التقنية، في وجه تطوير مستودع جيولوجي دائم يلبي المتطلبات التنظيمية الحالية، ولكن التجارب السابقة تبين أن ضمان قبول الرأي العام وثقته بالمؤسسات المكلفة بتنفيذ الحل التكنولوجي، قد يكونان أكثر صعوبة.

القضايا المؤسسية

سنقوّم قدرة الإطار المؤسسي الحالي وأداءه، بشكل يتجاوز موضوع النجاح أو الإخفاق في تحديد موقع المستودع؛ بهدف إنشاء معيار ننظر من خلاله إلى قيمة التغيير. وسنستخدم في هذا التقويم، فئتين من العوامل:

- كفاءة المؤسسات وقدراتها.
- أداء عمليات صنع القرار.

في سياق السياسة الوطنية لتحديد موقع لمستودع دائم، يشير تقويمنا إلى أن وزارة الطاقة ووكالة حماية البيئة وهيئة تنظيم الطاقة النووية، اتبعت إلى حد كبير، توجيهات الكونغرس، وإن بشكل أبطأ بكثير مما كان متوقعاً، مع تكبدها تكاليف أعلى بكثير وارتكابها بعض الأخطاء الإجرائية والتقنية الكبيرة. ولكن، كان هناك عوامل أخرى أثرت بشكل أكبر في النتائج؛ وهي: (1) انهيار الإجماع الأصلي؛ وفقاً لقانون سياسة النفايات النووية على إنشاء مستودعين: واحد في الشرق وآخر في الغرب، والتركيز - بدلاً من ذلك - على منطقة جبل يوكا، (2) ضعف الحوافز وتعارض المصالح داخل المؤسسات؛ ما أدى إلى فقدان ثقة الرأي العام وتوقف الجهود، (3) تركيز السياسة الشاملة التي عملت هذه المؤسسات - وفقها - على تحديد موقع المستودع على حساب وجود خطة شاملة لتخزين طويل الأجل، فوق الأرض، ومقاربة تدريجية لبناء المستودع.

إن أي تغيير في الإطار المؤسسي في المستقبل، يجب أن يُدرَس بعناية في سياق السياسة الوطنية لإدارة الوقود المستنفد. ولكنْ، وفقاً لتحليلنا، ثمة تغييران على المستوى المؤسسي، تجب دراستهما بشكل معمق؛ لمعرفة هل سيسهلان أي مسار يختاره الكونغرس والإدارة، أو لا؟ مع الإبقاء على الوضع الحالي:

- إعادة النظر في ملكية الوقود المستنفد، وتمويل توسيع مرافق التخزين في الموقع في غياب مستودع جيولوجي دائم.
- إعادة تقويم مسؤوليات المؤسسات في إدارة موارد الوقود المستنفد.

تتطلب استراتيجيات إدارة الوقود المستنفد جميعها، المحافظة على مرافق التخزين في الموقع وتوسيعها لمدة طويلة؛ وهذا يعني أن الالتزامات المالية المترتبة على الحكومة؛ جراء عدم تسلم الوقود المستنفد في المحطات العاملة، وهي التي تم تفكيكها، ستبقى في ازدياد ما لم يحدث تغيير في السياسات أو الممارسات. ولا تستطيع الحكومة الفيدرالية أن تغير من جانب واحد، بنود العقود الموقعة مع شركات المرافق بخصوص تسلم النفايات، ولكن يمكن إجراء تغييرات في قانون سياسة النفايات النووية، من شأنها أن توفر لتلك الشركات طريقة بديلة لتمويل التخزين في الموقع مدداً طويلة، وفي الوقت نفسه تعفي الحكومة من

التزامها بتسلم الوقود المستنفد بشكل فوري؛ فيمكن مثلاً، إبرام ترتيب يخضع لإشراف صارم من هيئة تنظيم الطاقة النووية، تقوم وفقه الحكومة بوضع الأموال اللازمة للتخزين الطويل الأجل، في حساب ضمان منفصل لكل محطة طاقة، مع احتساب فائدة على تلك الأموال؛ وهكذا، تبقى شركات المرافق مالكة للنفايات ولكنها تتحكم أيضاً في التمويل، ويكون لديها حوافز لإدارة تخزين النفايات بكفاءة، بما في ذلك: نقلها من المحطات التي تم تفكيكها إلى المحطات التي ماتزال تعمل؛ فتغيير هذا الجانب من القانون سيوفر مستوى مرونة أكبر بكثير للحكومة وللصناعة؛ وربما يسمح لها بتوفير في التكاليف، مع إزالة عقبة كبيرة تواجه الاستراتيجيات التي تتطلب المزيد من الوقت للبحث والتطوير والتنفيذ.

إن هذه التغييرات في تمويل التخزين في الموقع وإدارته، قد تكون ضرورية، ولكنها تبقى غير كافية لحل مشكلات قبول النفايات بشكل كامل؛ ولكي ينجح هذا المنهج، من المرجح أن يحتاج الرأي العام والصناعة إلى إدراج بنود في القانون توفر ضمانات موثوقاً بها؛ لتحقيق تقدم نحو تسلم الحكومة الفيدرالية، الوقود المستنفد خلال العقود القليلة المقبلة من خلال تمويل خاص، وعمليات تنظيم وإدارة تتسم بالشفافية والاستدامة والكفاءة؛ وللتخفيف من آثار تراجع ثقة الرأي العام وضعف الحوافز في الإطار القائم، من المرجح أن يمنح قيام مؤسسة جديدة خارج وزارة الطاقة بإدارة أي استراتيجية جديدة لإدارة الوقود المستنفد، قدراً أكبر من المصداقية. ويمكن أن تتخذ هذه المؤسسة أشكالاً مختلفة: عامة، أو خاصة، أو مشتركة بين القطاعين العام والخاص؛ كأن تكون شركة عامة على سبيل المثال.

الانعكاسات على السياسات

يعكس إلغاء التمويل مؤخراً، وسعي وزارة الطاقة لسحب طلب رخصة موقع جبل يوكا، إدراكاً عاماً بأن سياسة إدارة الوقود النووي المستنفد في الولايات المتحدة، بحاجة إلى إعادة النظر؛ وللمضي قدماً في هذا الاتجاه، سننظر في أربع استراتيجيات للسياسة، صيغت من خلال الجمع بين الأساليب التقنية؛ وكل استراتيجية تؤدي في نهاية المطاف، إلى تحديد موقع لمستودع دائم وترخيصه، ولكنها تختلف فيما بينها، من حيث كيفية تحقيق هذا

الهدف والمدة اللازمة لذلك. ويبين الجدول (م-2) هذه الاستراتيجيات والإجراءات اللازمة في كل منها على المدى القصير (5-10 سنوات)؛ لتخزين الوقود وإعادة تدويره والتخلص منه.

الجدول (م-2)

استراتيجيات إدارة الوقود النووي المستنفد

الاستراتيجية	الإجراءات القصيرة الأجل		
	التخزين	إعادة التدوير	التخلص الدائم
تسريع العمل على مستودع جبل يوكا	مواصلة التخزين في المواقع إلى أن يصبح مستودع جبل يوكا جاهزاً	المحافظة على المستوى الحالي من بحوث دورة الوقود المتقدمة	فتح مستودع جبل يوكا
تطوير التخزين المركزي المؤقت إلى جانب التخلص الجيولوجي الدائم	تطوير مرافق تخزين مركزية	المحافظة على المستوى الحالي من بحوث دورة الوقود المتقدمة	البحث عن مواقع بديلة
السعي لتنفيذ دورات الوقود المتقدمة	مواصلة توسيع مرافق التخزين في الموقع أو تطوير مرافق تخزين مركزية	التوسع بقوة في جهود تطوير دورة الوقود المتقدمة	عدم الالتزام بأي خطة زمنية أو بأي موقع محدد
الاستمرار في التخزين في الموقع وتوسيع مرافقه	مواصلة توسيع مرافق التخزين في الموقع	المحافظة على المستوى الحالي من بحوث دورة الوقود المتقدمة	عدم الالتزام بأي خطة زمنية أو بأي موقع محدد

تختلف كل استراتيجية عن غيرها، في تركيز الموارد اللازمة فيها على المدى القصير؛ فجميع الاستراتيجيات تتضمن استمرار التخزين في الموقع خلال العقد المقبل على أقل تقدير، وقد يستمر هذا التخزين في بعض الاستراتيجيات عقوداً كثيرة. وبرغم استحالة التنبؤ بالجداول الزمنية بشيء من الثقة، فإن التجارب الماضية والحالة الراهنة للتكنولوجيا، تشير إلى أن ترخيص موقع جبل يوكا أو أي منشأة تخزين مركزي مؤقت، سيستغرق ما لا يقل عن عقد من الزمن، وبناء مستودع جيولوجي دائم جديد، سيتطلب عقدين أو أكثر، أما تنفيذ دورات الوقود المتقدمة فسيحتاج إلى عقود عدة، وعلاوة على ذلك – حتى بعدما يصبح بالإمكان التخزين المركزي للوقود المستنفد أو التخلص منه

أو إعادة تدويره – فإن استكمال نقل الوقود المستنفد المخزن حالياً في مواقع محطات التوليد النووية سيستغرق عقوداً عدة.

ليس القصد من الاستراتيجيات تقديم قائمة كاملة للخيارات المتاحة، ولكنها اختيرت، بحيث تغطي مجموعة من الأساليب، وتوضح بعض انعكاساتها المهمة على السياسات؛ وللمساعدة في إثراء المناقشات المتعلقة بوضع السياسات، نلقي نظرة إلى كل استراتيجية، من حيث الأولويات المجتمعية لأسلوب إدارة الوقود المستنفد التي يجب أن تحتل مكان الصدارة؛ لكي يكون هو الأسلوب المفضل، وانعكاسات ذلك على رفاه الأجيال القادمة، وآثاره في مستقبل الطاقة النووية في الولايات المتحدة الأمريكية.

أولويات إدارة الوقود المستنفد التي من شأنها ترجيح كفة الاستراتيجيات المختلفة

لكل واحدة من السياسات البديلة انعكاسات مختلفة إلى حد كبير، من حيث الأولويات المجتمعية لإدارة الوقود المستنفد النووي؛ فإذا كنا نرى أن الأولوية الرئيسية يجب أن تكون لتوفير القدرة على التخلص من الوقود المستنفد بأسرع وقت ممكن – إما لأننا نؤمن بأنه لا يجوز تأجيل التخلص من هذا الوقود إلى المستقبل، أو لأننا نؤمن بأنه يجب التأكد من جدوى دورة الوقود بكاملها قبل متابعة تطوير الطاقة النووية – فإن المضي في مشروع مستودع جبل يوكا، هو الخيار الأمثل. وهذه الاستراتيجية تسمح بتحقيق التزام الحكومة الفيدرالية بتسلم الوقود المستنفد، وتمهد الطريق للتوسع في الطاقة النووية. وإذا كانت الأولوية هي للسماح بالتوسع في استخدام الطاقة النووية مع التركيز على الثقة في عملية صنع القرار المرتبط بتطوير المستودعات وأدائها، فستكون الاستراتيجية التدريجية التي تجمع ما بين التخزين المركزي المؤقت، وتحديد موقع لمستودع جيولوجي دائم جديد أكثر جاذبية. وإذا كان هناك دعم قوي لتحقيق زيادة كبيرة جداً في استخدام الطاقة النووية؛ ما يعني – في نهاية المطاف – التركيز على سعة المستودع وموارد اليورانيوم، فالخيار الأفضل، هو إعادة تدوير الوقود المستنفد من خلال دورة الوقود المتقدمة. وأخيراً، نقول: إذا كان هناك شعور سائد بعدم اليقين بالنسبة إلى أداء المستودع أو السلامة العامة أو الأمن أو التكلفة أو القبول السياسي للطاقة النووية، فقد يكون استمرار التخزين في الموقع هو الخيار المناسب.

لكل واحدة من الاستراتيجيات البديلة آثار مختلفة إلى حد كبير، من حيث تقاسم المسؤوليات بين الأجيال الحالية والأجيال القادمة، وأحد الاختلافات الواضحة هو أن الاستراتيجيات المختلفة تصل إلى مراحل مختلفة، من حيث التقدم نحو التخلص النهائي من الوقود المستنفد؛ فالمضي قدماً في مشروع جبل يوكا، أو استراتيجية التخزين المؤقت مع الانتقال تدريجياً إلى التخلص الجيولوجي الدائم، يوفران حلاً للتخلص النهائي في المدى القريب نسبياً، أما العمل على تطبيق دورات الوقود المتقدمة، فسيقلل من حاجة الأجيال القادمة إلى مستودعات تخزين ذات طاقة استيعابية كبيرة، بحسب تفصيلات التكنولوجيا المختارة. ولكن تحقيق تلك الفوائد يتطلب استثمارات كبيرة مدة طويلة، مع وجود درجة كبيرة من عدم اليقين بالنسبة إلى النتائج، كما أن النفايات الأخرى الناتجة من تلك العمليات، قد تتطلب التخلص منها في مستودع جيولوجي عميق. واستمرار التخزين في الموقع، يترك عبء التخلص من تلك النفايات بكامله للأجيال القادمة.

وثمة اختلاف آخر، يتعلق بمستوى عدم اليقين الذي نتركه للأجيال القادمة؛ فمشروع جبل يوكا، واستراتيجية التخزين المؤقت، مع الانتقال تدريجياً إلى التخلص الجيولوجي الدائم، أمور تترك أقل قدر من عدم اليقين. والسعي لتطبيق خيار دورة الوقود المتقدمة، سيوفر للأجيال القادمة مزيداً من المعلومات عن جدوى هذا الأسلوب، والسلامة والأمن اللذين يوفرهما. ولكن إذا تم هذا على حساب جهود التخزين المركزي أو المستودع الدائم، فستكون لدى الأجيال القادمة معلومات أقل مما يلزم؛ لتطبيق هذه الحلول التقليدية الأكثر رجحاناً؛ ونظراً إلى اختلاف الأساليب والأغراض المحتملة لتكنولوجيات دورة الوقود المتقدمة أيضاً، لا يمكن الجزم بأن هذه الاستراتيجية؛ ستؤدي - في نهاية المطاف - إلى تحقيق فوائد كبيرة، من حيث تقليص متطلبات سعة المستودع؛ فمواصلة التخزين السطحي تطيل حالة عدم اليقين الحالية، بشأن أفضل الأساليب لإدارة الوقود النووي المستنفد.

سيكون لتسريع عملية ترخيص مستودع جبل يوكا، واستراتيجيات التخزين المؤقت، مع الانتقال تدريجياً إلى التخلص الجيولوجي الدائم، أثر إيجابي كبير في مستقبل الطاقة النووية؛ لأنها ستسمح بسرعة للحكومة الفيدرالية بتحقيق التزامها التعاقدي بتسلم الوقود النووي المستنفد الذي تمتلكه الآن شركات المرافق؛ وهذا من شأنه، إزالة العقبات التي تعترض النمو؛ بسبب المخاوف المتعلقة بالوقود المستنفد. ويمكن استراتيجية دورة الوقود المتقدمة أن تساعد في تمهيد الطريق؛ لتطوير محطة جديدة للطاقة النووية، إذا كانت تتضمن آليات لتحسين شروط الملكية، وتمويل استمرار التخزين السطحي للوقود المستنفد. وأخيراً، فإن استمرار عدم الحسم بشأن سياسة إدارة الوقود المستنفد وتعقيد ترخيص المفاعلات الجديدة واستمرار التخزين في الموقع، أمور تعني عدم فعل شيء لتسهيل نمو الطاقة النووية، وقد يكون لذلك أثر سلبي، من خلال تعقيد القدرة على ترخيص مفاعلات جديدة.

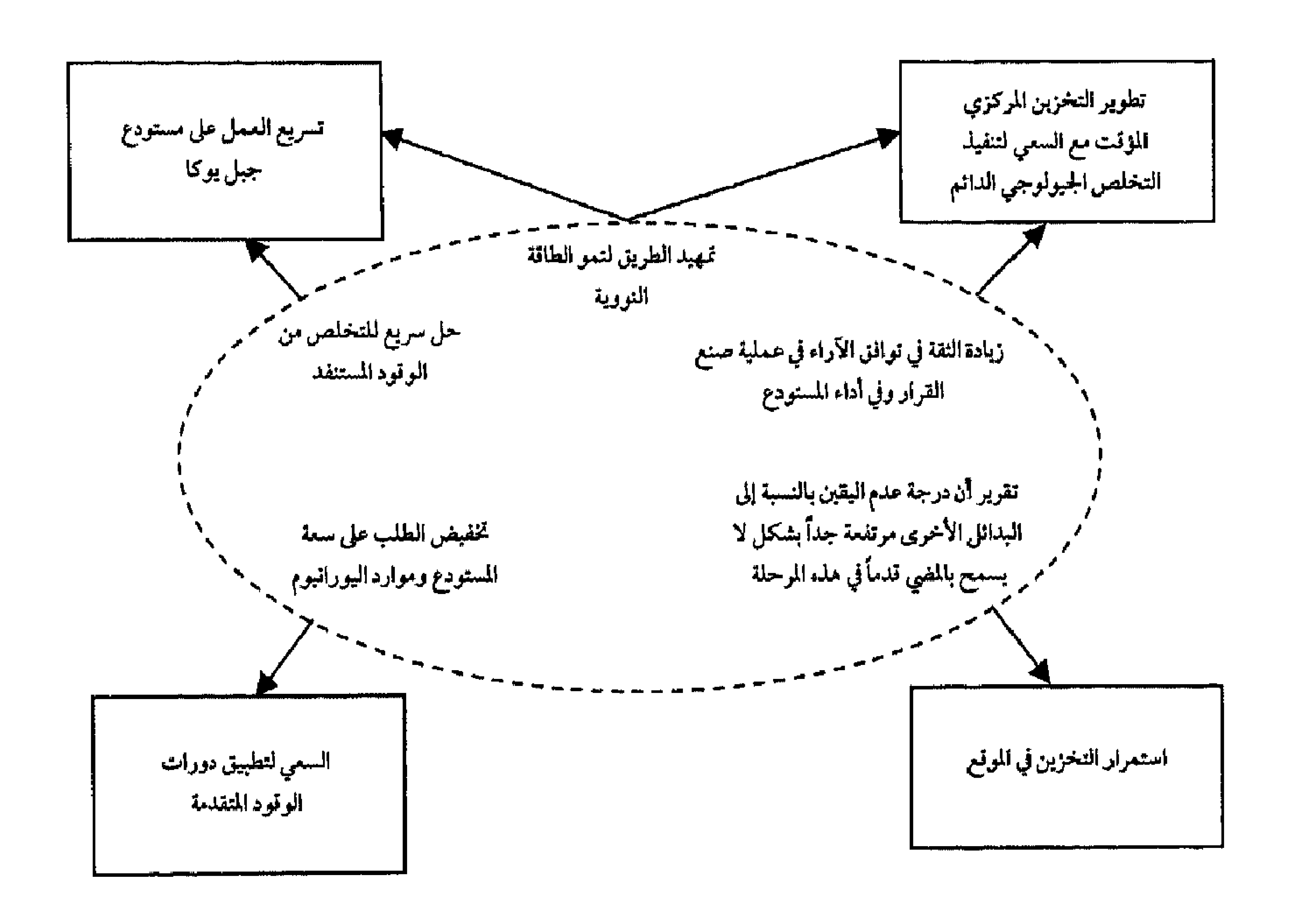
التمييز بين الاستراتيجيات

يعتمد اختيار السياسة البديلة في المقام الأول، على التفضيلات المجتمعية بشأن التخلص من الوقود المستنفد ونمو الطاقة النووية وتقاسم المسؤوليات بين الأجيال. وهذا التحليل، يسلط الضوء على الآثار المترتبة على كل استراتيجية في سياق هذه التفضيلات المجتمعية. والنتائج لا تميز بين الاستراتيجيات المختلفة؛ وفقاً لتفضيلات مجتمعية فريدة؛ فبعض الأولويات يتوافق واستراتيجيات عدة، وبعضها يتوافق وأولويات عدة، ولكنها تساعد في تقييد نطاق الاستراتيجيات المركبة. ويظهر الشكل (م-2) الترابط بين الاستراتيجيات والأولويات المحتملة. والسعي لتطبيق دورات الوقود المتقدمة، هو خيار جذاب بشكل رئيسي، إذا كانت هناك قيود كبيرة على سعة المستودع أو موارد اليورانيوم. واستمرار في التخزين في الموقع، هو خيار جذاب فقط؛ إذا عدت الخيارات الأخرى جميعها غير مقبولة. والمضي قدماً في العمل على مشروع جبل يوكا أو استراتيجيات التخزين المركزي مع الانتقال تدريجياً إلى التخلص الجيولوجي الدائم، هو الخيار الأكثر جاذبية

عندما تكون الأولويات، هي نمو الطاقة النووية وعدم ترك مهمة التخلص من الوقود المستنفد للأجيال القادمة، والاختيار بين هذه الخيارات، يعتمد على أهمية زيادة الثقة بالتوافق على قرار، وبأداء المستودع الجيولوجي الدائم؛ ولذلك، فإن اختيار الاستراتيجية يقتضي تقويم هذه التفضيلات بين أصحاب المصالح: وقد يكون من الصعب الوصول إلى توافق في الآراء، بل من عدم المرجح وجود استراتيجية واحدة، ترضي جميع أصحاب المصالح في كل الأبعاد الثلاثة التي ندرسها. ولكننا جمعنا "الاعتبارات" التقنية والمؤسسية الكثيرة على شكل مجموعة محدودة من التفضيلات؛ أملاً في أن يسهم هذا التحليل في بناء توافق في الآراء والمساعدة في توجيه عملية صنع القرار.

الشكل (م-2)

الترابط بين الاستراتيجيات والأولويات المجتمعية المحتملة



شكر وتقدير

نتقدم بالشكر، إلى: كارلوس دي بيلا ودانيال ميتلاي وكارين سيفرسون من مجلس المراجعة التقنية للنفايات النووية، وريتشارد ميسيرف الرئيس السابق لهيئة تنظيم الطاقة النووية، وتوماس كوشران مدير البرنامج النووي في مجلس الدفاع عن الموارد الطبيعية، وستيفن كرافت مدير إدارة الوقود المستنفد في معهد الطاقة النووية، على المناقشات والمعلومات التي قدموها لهذه الدراسة، كما قدمت كيث كرين من مؤسسة راند توجيهات مفيدة في المراحل الأولى من الدراسة. ونشكر – أيضاً – توماس كوتون من كومبليكس سيستمز جروب وغريغوري جونز من مؤسسة راند، وهما اللذان قاما بمراجعة مسودة هذه الدراسة، وقدما ملاحظات ممتازة أسهمت في تحسينها بشكل كبير.

الفصل الأول

أين نحن الآن؟ وكيف وصلنا إلى هنا؟ وما القرارات التي نواجهها؟

الطاقة النووية هي أسلوب لتوليد الكهرباء يسبب انبعاث غازات الاحتباس الحراري بقدر أقل بكثير من توليد الكهرباء باستخدام الفحم أو الغاز الطبيعي. لذلك فإن زيادة نسبة الطاقة النووية في مزيج تكنولوجيات توليد الطاقة الكهربائية هي إحدى طرائق الحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري؛ وهذا ما دفع بعض المحللين إلى دراسة ما يلزم من سياسات وقدرات تقنية من أجل تحقيق زيادة كبيرة في توليد الكهرباء بالاعتماد على الطاقة النووية في جميع أنحاء العالم (MIT, 2003, 2010).

ومع أن الطاقة النووية توفر نحو 20٪ من الكهرباء المولدة في الولايات المتحدة (NEA, 2009b)، فلم يُطلب بناء محطة لتوليد الكهرباء من الطاقة النووية في الولايات المتحدة منذ بدء العمل على محطة ريفر بيند للطاقة النووية في عام 1977 (EIA, 2009). ولكي تُبنى محطات جديدة للطاقة النووية في الولايات المتحدة، يجب التغلب على مخاوف عدة تتعلق بإدارة الوقود المستنفد والتكلفة والسلامة والأمان (DOE, 2010c; Holt, 2009b; MIT, 2003). وبينما تتسم جميع هذه المخاوف بالأهمية، فإن المأزق القائم منذ عقود حول كيفية إدارة الوقود المستنفد قد يكون أكبر عقبة في وجه المحافظة على الطاقة النووية في الولايات المتحدة أو زيادتها.

الوضع الحالي

حتى أواخر عام 2009، كانت الاستراتيجية الوطنية لإدارة الوقود النووي المستنفد تستند بشكل أساسي إلى قانون سياسة النفايات النووية لسنة 1982 وتعديلاته.[1] ووفقاً لهذه الاستراتيجية، يترك الوقود النووي المستنفد (المكون من مجموعات من قضبان الوقود الصلبة المزالة من مفاعلات الطاقة النووية) ليبرد في أحواض مياه في محطات الطاقة النووية العائدة ملكيتها إلى القطاع الخاص أو البلدية؛ ومن ثم يعبأ ويشحن إلى مستودع

دائم عميق تحت الأرض (مستودع جيولوجي دائم) تملكه الحكومة الفيدرالية وتديره. وعندما يصبح المستودع جاهزاً، يكون بإمكان الحكومة الفيدرالية تسلم الوقود المستنفد ونقله إلى المستودع. وبحسب قانون سياسة النفايات النووية، كان من المفترض أن يكون المستودع جاهزاً لاستقبال الوقود المستنفد بحلول عام 1998؛ ومن ثم عزله عن البيئة المحيطة به لئلا يعود يشكل خطراً على صحة أو سلامة الإنسان أو الحيوان أو النبات (أي لفترة يُعتقد عموماً بأنها لا تقل عن عشرات الآلاف من السنين).

وحتى الآن مازال كامل الوقود التجاري المستنفد موجوداً في محطات الطاقة النووية، ولم تصدر رخصة لمستودع جيولوجي دائم. واليوم تُنتج عمليات التوليد التجاري للكهرباء من الطاقة النووية في الولايات المتحدة حوالي 2,000 طن معدن ثقيل[2] من الوقود المستنفد كل سنة (DOE, 2008d). وفي كانون الأول/ ديسمبر عام 2008، وصلت كمية المعدن الثقيل المخزن في مواقع محطات الطاقة النووية الحالية أو السابقة في جميع أنحاء الولايات المتحدة إلى 60,000 طن (McCullum, 2009; NRC, 2010b). وبموجب التعديلات على قانون سياسة النفايات النووية في سنة 1987 تقرر أن يكون جبل يوكا في نيفادا هو الموقع الوحيد لإنشاء مستودع جيولوجي. ولكن بعد أكثر من 20 سنة من البحث والتحريات التقنية والجدل السياسي، لم توافق هيئة تنظيم الطاقة النووية على المستودع أو ترخص بناءه. ومؤخراً قامت إدارة أوباما بإلغاء تمويل مشروع جبل يوكا (Behr, 2009)، وبتاريخ 3 آذار/ مارس عام 2010 سحبت وزارة الطاقة الأمريكية طلب الرخصة الذي قدمته إلى هيئة تنظيم الطاقة النووية لجعل جبل يوكا موقعاً لمستودع دائم للوقود النووي المستنفد (DOE, 2010b).

ومن خلال وقف المسار المحدد مسبقاً لإدارة الوقود النووي المستنفد، فإن الإدارة قامت بتعليق السياسة الوطنية الحالية وشرعت في إعادة النظر في الاستراتيجيات البديلة للمضي قدماً في هذا المجال. وبتاريخ 29 كانون الثاني/ يناير 2010، كوّن وزير الطاقة الأمريكي لجنة خبراء تعرف باسم لجنة بلو ريبون بشأن المستقبل النووي للولايات المتحدة مهمتها تقديم التوصيات بخصوص إدارة الوقود النووي المستنفد والنفايات النووية الأخرى. ويشمل نطاق عمل اللجنة:

إجراء مراجعة شاملة لسياسات إدارة المراحل الأخيرة من دورة الوقود النووي، بما في ذلك جميع البدائل للتخزين والمعالجة والتخلص من الوقود النووي المستخدم في الأغراض المدنية وأغراض الدفاع والنفايات العالية الإشعاع[3] والمواد الناتجة من النشاطات النووية (DOE, 2010a, p. 1).

وعلى حين أن هذا التوقف لا يعني بكل تأكيد أن المعارف والخبرات المكتسبة من دراسة بناء مستودع في جبل يوكا ضاعت سدى، وربما لا يعني بالضرورة التخلي النهائي عن مشروع جبل يوكا، فهو يمثل اعترافاً بأن الاستراتيجية السابقة ربما لم تنجح في توفير حل، وأن هناك حاجة إلى إجراء مراجعة رئيسية للسياسة.

خلفية تاريخية

منذ بدء الاستخدام التجاري للطاقة النووية لتوليد الكهرباء في الولايات المتحدة، كان الوقود النووي المستنفد يخزن في محطات الطاقة النووية. ولكن لم يكن القصد أن يكون التخزين في الموقع هو الحل النهائي لإدارة الوقود المستنفد. وقبل أواخر السبعينيات، كانت الصناعة ولوائح الهيئات التنظيمية التابعة للحكومة الأمريكية تسعى لإعادة معالجة الوقود المستنفد. وكان من المفترض تخزين الوقود المستنفد في محطات الطاقة النووية التجارية لسنوات قليلة فقط؛ حيث سيسمح هذا بانخفاض مستويات الإشعاع بدرجة يمكن معها تعبئة الوقود المستنفد وشحنه إلى محطة لإعادة المعالجة يتم فيها فصل اليورانيوم والبلوتونيوم كيميائياً عن الكمية الصغيرة نسبياً من نواتج الانشطار الشديدة الإشعاع. أما بالنسبة إلى نواتج الانشطار شديدة الإشعاع والمعادن الثقيلة التي لا يمكن تدويرها، فإنه يجب في نهاية المطاف التخلص منها في مرافق تخزين دائمة، بينما يمكن إعادة استخدام جزء كبير من اليورانيوم والبلوتونيوم وقوداً. ولكن نظراً إلى الانخفاض النسبي لكلفة اليورانيوم الطبيعي وارتفاع تكاليف المعالجة، تراجع الاهتمام بمحطات إعادة المعالجة التجارية في أواخر السبعينيات. وفي الوقت نفسه أسهمت المخاوف من إمكانية استخدام البلوتونيوم في الوقود المدني المستنفد لصنع أسلحة نووية في إنهاء الدعم الفيدرالي لإعادة المعالجة التجارية (J. Carter, 1977).

بعدما سحبت الحكومة الأمريكية دعمها لإعادة المعالجة التجارية، وبعدما اعتبرت الشركات الخاصة ذلك مكلفاً جداً، قامت الدولة بمراجعة شاملة للسياسات من أجل وضع استراتيجية لإدارة النفايات النووية على المدى الطويل. وبرغم أن الحاجة إلى مستودع جيولوجي دائم أمر مفهوم منذ وقت طويل، وبرغم بدء دراسة المواقع الممكنة للمستودع وتصميماته المحتملة، فقد بدأ يظهر شعور بأنه ليس هناك إدراك كامل للتحديات التقنية والسياسية التي تواجه إدارة الوقود النووي المستنفد وأن هناك حاجة إلى بذل المزيد من الجهود لتطوير حل قابل للتطبيق. ومن الخطوات الرئيسية التي تضمنتها هذه المراجعة تكوين مجموعة المراجعة المشتركة بشأن إدارة النفايات النووية، التي تكونت من 14 هيئة حكومية فيدرالية منفصلة (IRG, 1979). وفي ظروف مشابهة من بعض النواحي للوضع الذي نواجهه اليوم، سعت مجموعة المراجعة المشتركة لـ «تطوير سياسة وطنية وبرنامج متكامل لإدارة النفايات النووية» (IRG, 1979, p. 1).

أرست النتائج والتوصيات التي خلصت إليها مجموعة المراجعة المشتركة الكثير من الركائز الأساسية للأفكار التي أدت إلى الاستراتيجية التي نص عليها قانون سياسة النفايات النووية لسنة 1982، ومن أبرزها مقولة أن الجيل الذي يستفيد من النشاطات التي ينتج منها نفايات نووية يجب أن يتحمل أعباء التخلص من تلك النفايات، وأن التكنولوجيات المرشحة للتخلص من الوقود المستنفد بخلاف المستودعات الجيولوجية الدائمة مازالت حديثة العهد، ومن المبكر النظر فيها عند وضع السياسات، وأن النشاطات القصيرة الأجل يجب أن تقوم على افتراض أن التخلص النهائي سيكون في نهاية المطاف في مستودعات جيولوجية دائمة، وأنه يجب دراسة مواقع عدة في بيئات جيولوجية مختلفة لتحديد الخيارات الأنسب، وأن مرافق التخزين المركزي المؤقت هي خيار جذاب ولكنها ليست ضرورية (IRG, 1979). كما أن تقرير مجموعة المراجعة المشتركة تضمن تقويماً للكثير من التفصيلات التقنية والقيود والجوانب غير المؤكدة، وسلط الضوء على الجوانب المؤسسية والإدارية التي تؤثر في توجيه السياسة والتطبيق.

ومع اعتماد قانون سياسة النفايات النووية في عام 1982، تحولت سياسة الحكومة الأمريكية من الناحية الفعلية نحو دعم التخلص المباشر من الوقود المستنفد المنقول من المفاعلات. ولم يأتِ القانون على ذكر دورة الوقود المفضلة، ولكنه وجه وزارة الطاقة

لتوفير مستودعات للوقود المستنفد وللنفايات العالية الإشعاع. كما أنه ألـزم وزارة الطاقـة بأن تكون قادرة على قبول الوقود التجـاري المـستنفد بحلـول كـانون الثـاني/ ينـاير 1998 والتخلص منه بشكل نهائي في مستودع جيولوجي تحت الأرض. ولكن القـانون لم يـنص على أن يرسل المُلاك الوقود المستنفد فور افتتـاح المـستودع أو أن تـدفن الـوزارة النفايـات خلال مهلة زمنية محددة.

ولتـمويل البرنامج، فُرض على شـركات المـرافق رسـم مقـداره 0.001 دولار لكـل كيلو واط في الساعة من الكهرباء المولدة بواسطة الطاقة النووية، على أن يعدل هذا الرسـم بحسب الضـرورة لـضمان اسـترداد التكلفـة الكاملـة لإدارة النفايـات والـتخلص منهـا. وأودعت تلك الرسوم في حساب لدى الخزانـة تحـت اسـم صـندوق النفايـات النوويـة. وأُسس مكتب إدارة النفايات المشعة الناتجة من النـشاطات المدنيـة التـابع لـوزارة الطاقـة ليتولى تشغيل البرنامج.

في عام 1986 اختارت وزارة الطاقة ثلاثة مواقع مرشحة للمستودع الأول، وأرجأت إلى أجل غير مسمى البحث عن موقع للمستودع الثاني. وفي عام 1987 أجرى الكونغرس تعديلاً على قانون سياسة النفايات النووية نص على أن يكون جبل يوكا هو الموقع الوحيـد الذي تتم دراسته لمعرفة إن كان مناسباً لإقامة مستودع جيولوجي أو لا. وحتى قبـل ذلـك الوقت كانت جهود تطوير الموقع تؤجل بشكل مستمر بسبب المخاوف التنظيمية والبيئيـة والمعارضة المستمرة في ولاية نيفادا.[4]

كما سمح قانون سياسة النفايات النووية للحكومة الفيدرالية بتطـوير منـشأة تخـزين مؤقت، وهو أمر يتطلب قـدراً أقـل مـن الجهـود التقنيـة والـسياسية ويـسمح للحكومـة الفيدرالية بالوفاء بالتزاماتها في تسلم الوقود المستنفد بحلول عـام 1998 ريـثما يـتم إنجـاز المستودع الجيولوجي الدائم. وقد حاولت وزارة الطاقة في مناسبات عدة في الثمانينيـات أن تدرج في خططها بناء منشأة للتخزين المؤقت، ولكن الكونغرس أحبط تلـك المحـاولات، فتعديلات قانون سياسة النفايات النووية التي أقرت في عام 1987 قيدت شروط التخزين المؤقت بشكل لم يعد هذا معه هذا الخيار ممكناً. وانعكس الأمر في التسعينيات عندما حاول

الكونغرس إنشاء مرفق للتخزين في ولاية نيفادا ولكنه لقي معارضة من إدارة بيل كليتتون (Cotton, 2010). ولكن ربما تكون الصعوبة الأكبر التي واجهت مساعي تنفيذ التخزين المركزي المؤقت هي عدم رغبة أي ولاية باستضافة منشأة من هذا النوع.

دفع عدم رضا إدارة باراك أوباما عن خيار جبل يوكا تلك الإدارة إلى تعليق جهود تنفيذ المشروع وعملية الترخيص وإجراء مراجعة شاملة مجدداً لخيارات الأساليب والسياسات البديلة من أجل وضع استراتيجية جديدة لإدارة الوقود النووي المستنفد. وقد واجهت بلدان أخرى، بما فيها كندا والمملكة المتحدة وفرنسا، صعوبات مشابهة في اختيار مواقع المستودعات دفعتها إلى إجراء مراجعات مماثلة للسياسات في السنوات الأخيرة.

مواجهة المشكلة مجدداً!

لكي تكون الطاقة النووية قابلة للاستدامة ويقبلها الرأي العام، يجب على الصناعة النووية والحكومة إيجاد مسار والاتفاق عليه لإدارة الوقود النووي المستنفد، بحيث يلبي بشكل مقنع معايير السلامة والبيئة. وقد ثبت أن إدارة الوقود النووي المستنفد مسألة تتضمن تحديات كبيرة على المستويين التقني والسياسي. ولكنّ هناك سؤالاً واحداً تواجهه البلاد اليوم ولم يتغير منذ عقود: وهو: ما البدائل لإدارة الوقود النووي المستنفد وتخزينه والتخلص منه بأمان؟ ثم كيف يمكن تصنيف هذه البدائل بشكل يسمح بفهم الآثار المترتبة على كل منها؟ وما انعكاساتها على السياسات؟

بعض جوانب مشكلة إدارة الوقود المستنفد ثابتة ولم تتغير، أبرزها الحاجة إلى مستودع جيولوجي دائم. فبعد أول دراسة قامت بها أكاديمية العلوم الوطنية للتخلص الجيولوجي الدائم عام 1957 (National Research Council, 1957)؛ أدت البحوث اللاحقة إلى إجماع دولي واسع بأنه يجب التخلص على المدى الطويل من النفايات المشعة الناتجة من توليد الكهرباء من الطاقة النووية بطريقة لا تحتاج إلى إدارة مستمرة؛ ومن ثم فإن التخلص الجيولوجي الدائم هو الطريقة التقنية الوحيدة المجدية لتحقيق ذلك (IAEA, 2003; National Research Council, 1996, 2001). ولكي تبقى الطاقة

النووية مصدراً مجدياً للكهرباء على المدى الطويل، سيكون من المهم إيجاد نظام فعال للتخلص الجيولوجي الدائم في إحدى المراحل.

ولكن لا يشترط أن يتم التخلص الجيولوجي الدائم بشكل فوري. فالخبرة المكتسبة حتى الآن من الممارسات الحالية لتخزين الوقود النووي المستنفد في مواقع المحطات النووية طوال عقود عدة، تشير إلى أنه لا توجد حاجة ملحة، سواء من منظور السلامة أو الأمن، إلى نقل النفايات إلى مستودع جيولوجي دائم. وقد عززت هيئة تنظيم الطاقة النووية هذا الشعور بإصدارها "إعلان الثقة بخصوص إدارة النفايات" لأول مرة في عام 1984 وتكراره في عام 1990، ويتم الآن تحديثه مرة أخرى (NRC, 1984, 1990, 2008b). وقد كشفت تجارب إدارة الوقود النووي المستنفد في جميع أنحاء العالم عن وجود خيارات عدة لإدارة الوقود النووي المستنفد قبل التخلص الجيولوجي الدائم؛ ونظراً إلى الصعوبات التي تواجه تطوير مستودع جيولوجي دائم، ماتزال هذه الخيارات المؤقتة تحظى باهتمام كبير.

ظهرت مسائل تقنية واقتصادية وبيئية أخرى تتعلق بإدارة الوقود المستنفد منذ السبعينيات. ومن أهم التغييرات الزيادة الكبيرة في الوعي للآثار السلبية للتغير المناخي العالمي وأهمية تقليص انبعاثات الوقود الأحفوري. وقد دفع هذا الوعي لإعادة النظر في زيادة دور الطاقة النووية، كما أنه قلص من معارضة الجماعات البيئية للطاقة النووية ويبدأ بزيادة قبول الرأي العام للطاقة النووية. ومن الاختلافات المهمة الأخرى توقف انتشار الطاقة النووية؛ حيث مازالت دون التوقعات السابقة بكثير (U.S. Atomic Energy Commission, 1972). وكما ستبين هذه الدراسة لاحقاً، فإن هذا يعزى جزئياً إلى استمرار تأخر الحكومة الفيدرالية في تسلم الوقود المستنفد. وفي الوقت ذاته، بما أن الكمية المتراكمة من الوقود المستنفد ماتزال أقل بكثير مما يفترض أن تكون عليه لو انتشرت الطاقة النووية بقدر أكبر؛ فربما أدى هذا إلى تراجع الشعور بأن هناك حاجة ملحة إلى إيجاد حل للتخلص من الوقود المستنفد إلى مستوى دون ما كان متوقعاً في السبعينيات. وبالإضافة إلى ذلك، وبرغم عدم حدوث تغيير جذري في تقنيات توليد الطاقة النووية، يجري العمل حالياً على تطوير تصميمات جديدة ومتطورة للمفاعلات، وأساليب جديدة لتدوير الوقود. وعلى حين ماتزال هذه القضايا تخضع

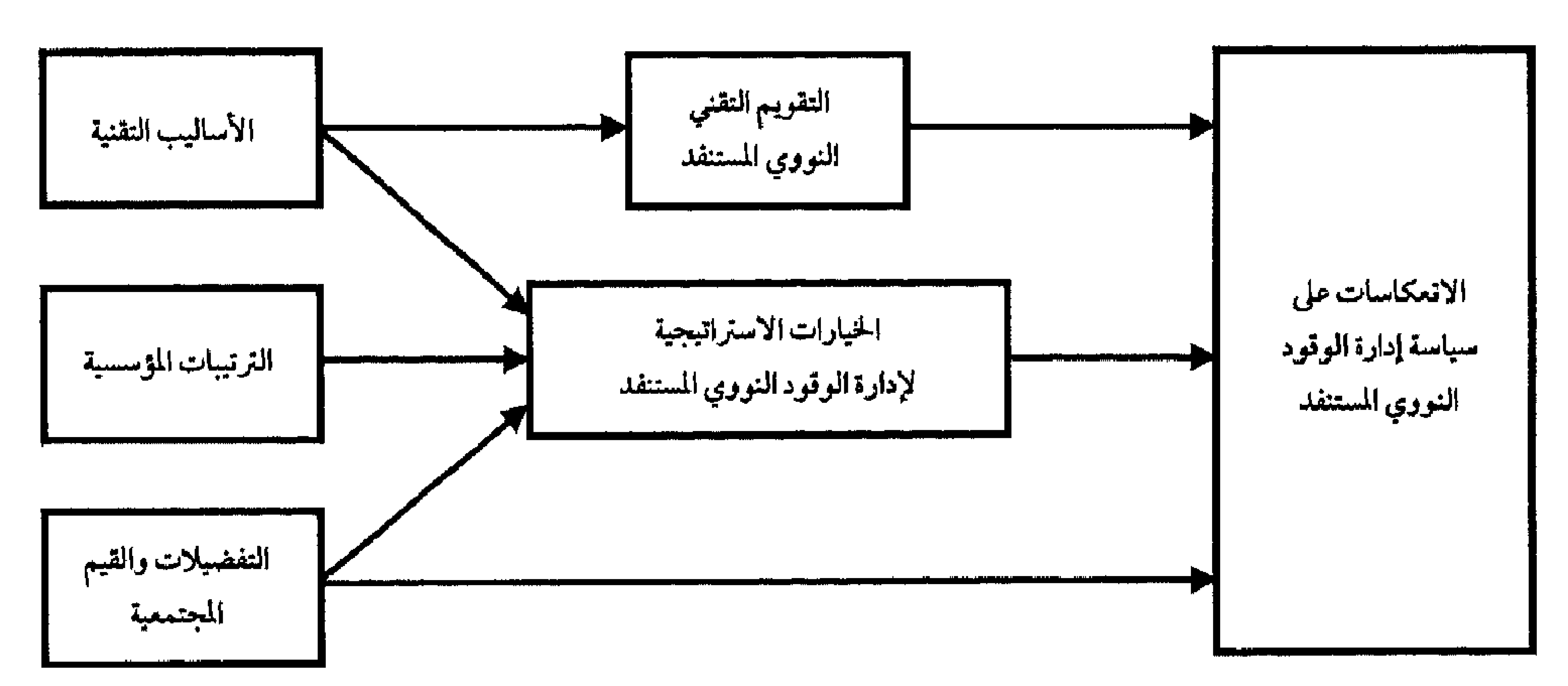
للمراقبة والمناقشة، لم يجرِ أي تحديث جوهري لسياسة إدارة الوقود المستنفد بسبب الآثار التي ستترتب على ذلك. فوضع سياسة جديدة لإدارة الوقود المستنفد يجب أن يتم في سياق جوانب الشبه والاختلاف عن الوضع الذي كان سائداً في الماضي.

أهداف الدراسة ومنهجها

تهدف هذه الدراسة إلى استعراض الوضع الحالي للعناصر التقنية والمؤسسية الرئيسية في إدارة الوقود النووي المستنفد وتحديد انعكاسات ذلك على صوغ السياسة الخاصة بتلك الإدارة. ونحن ندرس الانعكاسات على السياسات في سياق مجموعة من المناهج الاستراتيجية المحتملة. وبينما تشمل الاستراتيجيات المدروسة معظم الخيارات التي يجري النظر فيها حالياً، فإننا لا نقدم تقويماً شاملاً لجميع خيارات السياسة ولا نحاول أن نوصي باتباع سياسة معينة. ومن المهم أن نشير أيضاً إلى أن دراستنا قُصرت فقط على قضايا إدارة النفايات المرتبطة بالوقود المستنفد الناتج من النشاطات التجارية ولا تتطرق إلى القضايا المرتبطة بالوقود النووي المستنفد الناتج من النشاطات الدفاعية.

الشكل (1-1)

ملخص النهج التحليلي



يلخص الشكل (1-1) النهج المتبع في هذه الدراسة؛ حيث يقود تحليل الخطوات التقنية الرئيسية والترتيبات المؤسسية المتعلقة بإدارة الوقود النووي المستنفد، بجانب النظر في التفضيلات المجتمعية، إلى مجموعة من الخيارات الاستراتيجية. ثم تجري مقارنة

الخيارات الاستراتيجية في سياق التقويم التقني والتفضيلات المجتمعية لتوضيح انعكاسات ذلك على سياسة إدارة الوقود النووي المستنفد.

سنلقي نظرة إلى أربعة خيارات تقنية لإدارة الوقود النووي المستنفد الناتج من عمليات محطات الطاقة النووية التجارية:

- تقنيات التخزين السطحي في مواقع المحطات النووية الحالية (وهو المعروف بالتخزين في الموقع).
- التخزين المركزي المؤقت في مكان بعيد عن مواقع المحطات.
- دورات الوقود المتقدمة مع إعادة تدوير الوقود المستنفد.
- التخلص الدائم في مستودع جيولوجي عميق.

هذه الخيارات تشمل العناصر الأساسية في أي استراتيجية طويلة المدى لإدارة الوقود النووي المستنفد (Holt, 2009a). وأي استراتيجية لإدارة الوقود النووي المستنفد ستتكون من مزيج من هذه الخيارات التي سنقيمها؛ بناء على خمسة معايير، هي:

- السلامة.
- الأمن.
- العقبات التقنية.
- قبول الرأي العام.
- التكلفة.

هذه المعايير تشمل المخاوف الرئيسية المتعلقة بالطاقة النووية والتي ترد في المناقشات العامة وأدبيات الصناعة، ومن أمثلة ذلك: (National Research Council, 2001; Holt, 2009a; MIT, 2003).

كما نستعرض الترتيبات المؤسسية والقانونية والتنظيمية الحالية المتعلقة بإدارة الوقود النووي المستنفد لمعرفة إن كانت هناك عقبات في وجه تطبيق الخيارات التقنية، ونقوّم التشريعات ذات الصلة وأدوار الوكالات والعلاقات بينها ونسلط الضوء على أوجه القصور المهمة التي تحتاج إلى تحسين.

وبناء على تقويم الجوانب التقنية والمؤسسية، نقدم أربع سياسات استراتيجية يمكن العمل على تطبيقها. وفي حالة كل من هذه الاستراتيجيات، نصف خصائصها ونناقش الشروط التي ترجح كفتها ونسلط الضوء على التغييرات المؤسسية اللازمة لتسهيل نجاحها ونستعرض انعكاساتها على مستقبل الطاقة النووية في الولايات المتحدة الأمريكية وعلى الأجيال القادمة. والقصد من النتائج التي سيخلص إليها هذا التحليل هو دعم الجهود الرامية إلى إعادة رسم الخطة الاستراتيجية للبلاد في إدارة الوقود النووي المستنفد ومستقبل الطاقة النووية في الولايات المتحدة الأمريكية.

الفصل الثاني

الأساليب التقنية لإدارة الوقود النووي المستنفد

ندرس في هذا الفصل، أربعة أساليب مختلفة لإدارة الوقود النووي المستنفد: التخزين في الموقع، والتخزين المركزي المؤقت، ودورات الوقود المتقدمة، والتخلص الجيولوجي الدائم. ونقوّم كل أسلوب وفقاً لخمسة معايير، هي: السلامة، والأمن، والعقبات التقنية، وقبول الرأي العام، والتكلفة. ويركز تقويمنا بشكل رئيسي على الآثار القصيرة الأجل لكل أسلوب وحده، ولكن من المهم ملاحظة أن الجمع بين أكثر من أسلوب؛ قد يؤدي إلى مجموعة مختلفة من التكاليف والفوائد للأجيال الحالية والأجيال القادمة. وسنقوّم في الفصل الأخير الآثار النسبية في الأجيال الحالية والقادمة.

لقد كُتب كثيراً حول التخلص من النفايات النووية في المنشورات العلمية والسياسية والحكومية والبيئية والتجارية. وقد راجعنا هذه المنشورات لتحديد الآثار المترتبة على الخيارات المختلفة لإدارة النفايات؛ وفقاً لمعاييرنا الأساسية، بالإضافة إلى معايير أخرى. كما دعّمنا هذه المراجعة بلقاءات مطولة مع كثير من الخبراء في هذا المجال.

التخزين في الموقع

يتميز الوقود النووي المستنفد المزال من المفاعل النووي بإشعاعية عالية؛ حيث يطلق كميات كبيرة جداً من الطاقة؛ ولذلك، يجب تخزين قضبان الوقود المستنفد بشكل مؤقت، إلى أن تبرد بشكل يسمح بمناولتها ونقلها. والوقود المأخوذ من المفاعل يخزن أولاً كله في أحواض تسمح بتبريده حرارياً وإشعاعياً؛ ونظراً إلى زيادة فترات التخزين وامتلاء أحواض التبريد، بدأ نقل الوقود المستنفد إلى براميل التخزين الجافة.

أحواض الوقود المستنفد

تخزن قضبان الوقود المستنفد أولاً، في أحواض مياه، بحيث لا تقل سماكة المياه فوقها عن 20 قدماً، وتثبت القضبان على حوامل من الفولاذ والألمنيوم بشكل يمنع تسرب

الإشعاع منها. ويُربط المفاعل بالأحواض عبر قنوات يُنقل الوقود المستنفد عبرها إلى الأحواض؛ لحماية العمال من الإشعاعات. وكل فترة من 12 شهراً إلى 18، يُستنفد حوالي ربع الحمل الكلي للوقود أو ثلثه، ويزال من المفاعل ويستعاض عنه بوقود جديد (Bodansky, 1996)؛ ومادامت محطات الطاقة النووية جميعها في الولايات المتحدة تقريباً، صممت في وقت كانت فيه السياسة الأمريكية توجب إرسال الوقود المستنفد إلى محطات لإعادة معالجته، فإن تصميمات معظم محطات الطاقة النووية، تتضمن أحواضاً صغيرة نسبية مخصصة للتخزين القصير الأجل (أي من 10 سنوات إلى 15 سنة).

وفي أوائل الثمانينيات؛ أي عندما بدا واضحاً أن التخزين الدائم لن يصبح متاحاً عما قريب، بدأت شركات المرافق تنظر في الخيارات المتاحة لزيادة سعة تخزين الوقود المستنفد في الموقع. والنظم الحالية تسمح بإعادة ترتيب مجموعات قضبان الوقود؛ (أي تقريبها من بعضها بعضاً في أحواض الوقود المستنفد)، أو تجميعها؛ على أن يخضع ذلك لمراجعة هيئة تنظيم الطاقة النووية وموافقتها؛ لزيادة كمية الوقود المستنفد الذي يمكن تخزينه في الأحواض في الموقع. وهذان الأسلوبان، يمكنهما أن يضاعفا السعة التخزينية للحوض أربع مرات، ولكنهما يبقيان مقيدين بحجم الحوض. وبدءاً من عام 2001، كانت أحواض تبريد الوقود المستنفد ممتلئة بنسبة تزيد على 50٪، في أكثر من نصف مواقع المفاعلات النووية الأمريكية (Macfarlane, 2001).

براميل التخزين الجافة

على الرغم من الخطوات التي اتخذت لزيادة سعة التخزين في أحواض التبريد، بإعادة ترتيب قضبان الوقود وتجميعها، فقد كانت سعة التخزين الإضافية محدودة؛ ولذلك، بدأت شركات المرافق تبحث عن خيارات أخرى؛ مثل: براميل التخزين الجافة؛ لزيادة سعة تخزين الوقود المستنفد في الموقع. وفي عام 1985، تم ترخيص أول نظام تخزين جاف؛ وفق برنامج لتجربة التخزين الجاف، أوجبه قانون سياسة النفايات النووية. واليوم، انتقلت المؤسسات المرخصة في معظمها، نحو استخدام براميل التخزين الجافة فوق الأرض في محطات الطاقة النووية التي فيها أحواض تبريد ذات سعة تخزين محدودة، أو في المواقع التي تم تفكيكها.

ويسمح التخزين في البراميل الجافة بتخزين الوقود المستنفد، وهو الذي سبق تبريده في أحواض المياه، في حاوية يطلق عليها اسم برميل، يُحاط فيها الوقود بغاز خامل. وعادة ما تكون البراميل أسطوانات فولاذية ملحومة أو محكمة الإغلاق. وفي بعض التصميمات تُوضع الأسطوانات الفولاذية التي تحتوي الوقود بشكل عمودي داخل حجرة خرسانية، بينما توضع الأسطوانات بشكل أفقي في تصميمات أخرى. والأسطوانة الفولاذية تمنع تسرب الوقود المستنفد، وتحاط كل أسطوانة بطبقة إضافية من الفولاذ أو الخرسانة أو المواد الأخرى؛ لتوفير درع لحماية العاملين والجمهور. وهذه المادة الإضافية، تشكل حاجزاً يمنع حدوث أضرار مادية؛ قد تؤدي إلى تسرب الإشعاع. وبعض تصميمات البراميل يمكن استخدامه لأغراض التخزين والنقل.

وتعتمد المدة اللازمة لبقاء الوقود المستنفد في أحواض المياه، قبل التمكن من نقله إلى التخزين الجاف، على عدد من العوامل، من بينها: النسبة المئوية من اليورانيوم 235 الموجودة أصلاً في الوقود المخصب، وكمية اليورانيوم 235 الذي انشطرت نوياته؛ (أي استهلاك الوقود)، والتاريخ التشغيلي للوقود (Macfarlane, 2001). ومعظم البراميل مرخص لتخزين الوقود المستنفد الذي برد في الأحواض طوال مدة من خمس إلى عشر من السنوات على الأقل، بحسب تصميم البرميل (IAEA, 1999).

وفي نهاية عام 2008، بلغ مخزون الوقود النووي المستنفد الناتج من محطات الطاقة النووية المدنية أكثر من 60,000 طن معدن ثقيل. وهذا المخزون موزع على 131 مفاعلاً نووياً مدنياً، في 65 محطة طاقة نووية عاملة، و9 محطات طاقة مفككة (McCullum, 2009; NRC, 2010b). وتُوزع هذه المواقع على أكثر من 39 ولاية. وهناك حوالي 47,000 طن معدن ثقيل؛ (أي 79٪) من هذه الكمية مخزنة في أحواض التبريد، والباقي مخزن في براميل جافة (انظر الجدول 2-1). وتوجد تسعة من مواقع التخزين الجاف، في أماكن ليس فيها مفاعلات عاملة. ومن المتوقع أنه بحلول عام 2020، سيكون التخزين في البراميل الجافة، مطبقاً في جميع مواقع المفاعلات الحالية، وستبلغ كمية الوقود المستنفد المخزن في براميل جافة حوالي 30,000 طن معدن ثقيل (McCullum, 2009).

الجدول (2-1)

ملخص وضع التخزين في الموقع، كما هو في كانون الأول/ ديسمبر 2008

أسلوب تخزين الوقود النووي المستنفد التجاري	كمية الوقود النووي المستنفد المخزنة (طن معدن ثقيل)
التخزين في أحواض المياه	47,465
التخزين في البراميل الجافة	12,594
المجموع	60,059

المصدر: McCullum (2009).

تقويم استمرار الاعتماد على التخزين في الموقع

سيبقى التخزين في الموقع، الوسيلة الأساسية لتخزين الوقود النووي المستنفد، طوال عقود عدة على الأقل، وسيبقى ترك الوقود النووي المستنفد في الموقع، هو السياسة الفعلية للحكومة الأمريكية، إلى أن يتم صوغ استراتيجية بديلة لإدارة الوقود المستنفد. وفي هذه الحالة، سيزداد الاعتماد على التخزين في البراميل الجافة في الموقع؛ نظراً إلى محدودية مساحة التخزين في أحواض التبريد.

السلامة: ترى هيئة تنظيم الطاقة النووية، أن التخزين الجاف أكثر أماناً من التخزين في أحواض التبريد؛ وقد خلصت إلى أن التخزين الجاف للوقود المستنفد في محطات الطاقة النووية آمن لمدة 100 سنة على الأقل (NRC, 1990, 2008b). ونظم التخزين في البراميل الجافة، مصممة، بحيث تقاوم الفيضانات والأعاصير والقذائف ودرجات الحرارة القصوى وغيرها من التهديدات غير العادية لسلامة حاويات التخزين. ولم يُكتشف خلال السنوات العشرين الماضية، أي تسرب إشعاعي من الوقود المستنفد المخزن كان له أثر في الجمهور (NRC, 2005). وتجادل الجماعات البيئية وغيرها، بأن استمرار الاعتماد على التخزين في الموقع، يلغي على المدى القريب، مخاطر نقل الوقود المستنفد العالي الإشعاع، إلى منشأة تخزين مركزية (Holt, 1998)؛ فترك الوقود يبرد في الموقع زمناً أطول، سيجعل مناولته ونقله أكثر أماناً عند إزالته من الموقع (GAO, 2009).

وعلى حين لم تقع حوادث كبرى مرتبطة بالتخزين في الموقع في الولايات المتحدة، فقد ظهرت بعض المشكلات المتعلقة ببراميل التخزين الجافة؛ حيث تبين أن الطبقات العازلة على براميل التخزين الجافة في موقع مفاعل تروجان في أوريجون، ومفاعل باليساديس في ميشيغان، ومفاعلات بوينت بيتش في ويسكونسن، تنتج الهيدروجين؛ وهذا، قد يسبب انفجاراً. وقد عزت هيئة تنظيم الطاقة النووية، هذه المشكلات، إلى ضعف رقابة الشركات المزودة للبراميل على مقاوليها الفرعيين، وعدم قيام تلك الشركات بإجراء تقويم للجودة في أثناء عملية التصميم، وعدم التقيد بالمتطلبات التنظيمية في أثناء تصنيع البراميل (Macfarlane, 2001).

الأمن: تنص لائحة هيئة تنظيم الطاقة النووية التي أصدرت عام 2004، أن تتضمن جميع مرافق التخزين في الموقع، حاجزين ومراقبة مستمرة ونظاماً للتعرف إلى الهوية والقفل؛ وحتى الآن، لم تُعرض أي محطة طاقة نووية لأعمال تخريبية أو لسرقة الوقود النووي المستنفد منها. ومع ذلك، فقد تساءل اتحاد العلماء القلقين Union of Concerned Scientists (من دون تاريخ)، وجهاتٌ أخرى، عن مدى أمان النفايات النووية المتروكة في الموقع. وبعض هؤلاء يشير إلى أن الوقود النووي المستنفد، سيكون أكثر أماناً في التخزين المركزي عما هو عليه الآن (انظر مثلاً: L. Carter and Pigford, 1999). ولكن كما يشير ماكفارلين (Macfarlane, 2001)، فإنه حتى إذا حدث توجه نحو التخزين بعيداً عن مواقع المحطات، فسيبقى هناك دائماً بعض الوقود النووي المستنفد في محطات الطاقة النووية العاملة. كما أن البلوتونيوم في الوقود النووي المستنفد، موجود داخل قضبان عالية الإشعاع تصعب سرقتها (Bunn, Holdren, et al., 2001). واستخراج البلوتونيوم من هذه القضبان، يتطلب معدات متطورة وتدريباً خاصاً؛ ولذلك، فإن احتمال أن تؤدي خيارات تخزين الوقود النووي المستنفد فوق الأرض إلى انتشار السلاح النووي، هو احتمال ضعيف.

العقبات التقنية: بعكس الخيارات الأخرى التي تتناولها هذه الدراسة، فقد تمت معالجة معظم المشكلات التقنية القصيرة الأجل المرتبطة بالاستمرار في الاعتماد على التخزين في الموقع، إلا أن كثيرين من الخبراء يعتقدون بأنه سيجب في نهاية المطاف إعادة تغليف النفايات المخزنة في براميل جافة (GAO, 2009).[1] وعلى حين أن هناك جوانب

تقنية غير واضحة تتعلق بإعادة التغليف (مثل ما إذا كان يجب استبدال الحاوية الداخلية)، لا يبدو أن هناك أي عوائق تقنية جدية تمنع التطوير والتنفيذ لبروتوكولات إعادة التغليف بشكل سليم وآمن. ومع ذلك فإن متطلبات إعادة التغليف قد تفرض تكاليف إضافية وتزيد من تعرض العمال للإشعاع، وهذه أمور يجب أخذها في الحسبان عند تحديد المدة التي يمكن خلالها ترك الوقود النووي المستنفد في مواقع المفاعلات. وهذا تحديداً مصدر للقلق في حالة "الوقود المتروك"؛ أي الوقود المخزن في مواقع لم يعد فيها مفاعلات أو معدات لمناولة الوقود.

قبول الرأي العام: بينما تنص السياسة الحالية على ترك الوقود النووي المستنفد في الموقع، فإن الرأي العام عموماً لا يعد هذه الممارسة مقبولة. وقد عبر القاطنون بالقرب من محطات الطاقة النووية، وخاصة التي جرى تفكيكها ولم تعد - من ثم - تولد الكهرباء، عن معارضتهم للممارسات الحالية الممثلة بالسماح بتراكم الوقود النووي المستنفد في مثل هذه المواقع (NEA, 2003). ومع زيادة عدد المواقع المفككة، يرجح أن تزداد المعارضة للممارسات الحالية ويزداد التأييد لخيارات التخزين المركزي.

وبينما لم يكن لقبول الرأي العام إلا أثر محدود في محطات الطاقة النووية القائمة حالياً، فقد أدى إلى إيجاد عقبات سياسية كبيرة في وجه التوسع في صناعة الطاقة النووية. وعلى وجه الخصوص فإن المعارضة ضد تجديد مواقع تخزين الوقود المستنفد وتمديد رخص المفاعلات يرجح أن تزداد ما لم توضع خطة للتخلص النهائي من النفايات النووية .(GAO, 2009)

التكلفة: تفضل الشركات التي توفر الطاقة النووية بدء عملية نقل الوقود المستنفد إلى منشأة تخزين فيدرالية مؤقتة أو دائمة في أقرب وقت ممكن. وهذه الشركات تخشى بشكل خاص أن تتحمل مسؤولية المحافظة على مرافق التخزين في الموقع لمدة مفتوحة، وهي مخاوف نمت مع كل تأخير في الجدول الزمني لوزارة الطاقة لفتح مستودع دائم للنفايات (Holt, 1998). وفي حالة الانتقال إلى الاعتماد على نظم التخزين في الموقع لأمد طويل، فمن غير الواضح، كيف سيتم تمويل هذه التكاليف في المفاعلات الجديدة التي لم

تبرم عقوداً مع وزارة الطاقة لتسلم وقودها المستنفد؟ وبالنسبة إلى محطات الطاقة النووية العاملة حالياً، يبدو أنه من المرجح أن تتحمل هذه التكاليف الحكومة الفيدرالية، وفي نهاية المطاف: دافعو فواتير الكهرباء أو دافعو الضرائب، في ضوء التزام وزارة الطاقة بتسلم الوقود النووي المستنفد.[2]

تتراوح التقديرات المنشورة للتكاليف الرأسمالية الأولية لبناء منشأة تخزين في براميل جافة بين 15 مليون دولار و30 مليون دولار لكل موقع، بحسب قيمة الدولار في عام 2009.[3] أما تكاليف التشغيل والصيانة فتختلف اختلافاً كبيراً بين المفاعلات العاملة والمفككة. فتكاليف التشغيل والصيانة في مواقع المفاعلات العاملة تقدر بحوالي مليون دولار سنوياً، بينما يتوقع أن تبلغ تكاليف التشغيل والصيانة في مواقع المفاعلات المفككة ما بين 4 ملايين و15 مليون دولار، بحسب قيمة الدولار في عام 2009.[4] وبالإضافة إلى هذه التكاليف، هناك تكاليف نظام التخزين والشحن التي تدفع مرة واحدة وستختلف مع مرور الوقت وتراكم النفايات الجافة. وتشمل هذه التكاليف تكلفة براميل التخزين واليد العاملة والتفكيك، ولكن ربما لا يكون هناك مفر منها في جميع الخيارات؛ حيث إنها ضرورية لنقل النفايات من الموقع.

لتقويم التكاليف الإجمالية لاستمرار الاعتماد على التخزين في الموقع، لا بد من متابعة هذه التكاليف مع مرور الزمن ووضعها بناء على القيمة الحالية للدولار. وقد قدم مكتب المحاسبة الحكومي (GAO, 2009) التقويم الأكثر شمولية لتكلفة بدائل التخزين المختلفة على المدى الطويل. ووفقاً لتقديراته فإن القيمة الحالية (بحسب قيمة الدولار في عام 2009) لتخزين 153,000 طن من النفايات النووية في الموقع لمدة 100 سنة تتراوح ما بين 13 و34 مليار دولار.[5]

التخزين المركزي المؤقت

اقتُرح التخزين المركزي المؤقت؛ بوصفه حلاً قصير الأجل لمعالجة المشكلات المرتبطة بتراكم الوقود المستنفد في محطات الطاقة النووية، وخاصة التي جرى تفكيكها. ووفقاً لمعظم الاقتراحات، سيتم تخزين الوقود المستنفد في براميل جافة بطريقة تشبه طريقة تخزينه

في براميل جافة في محطات الطاقة النووية، ولكن سيتم تجميع الوقود المستنفد من مفاعلات كثيرة في موقع واحد بعد تركه فترة كافية ليبرد. هذه الطريقة ستسمح بتقليص كمية قضبان الوقود المستنفد المخزنة في أحواض في مواقع المفاعلات العاملة ولن تعود هناك حاجة إلى بناء مرافق للتخزين الجاف في تلك المواقع. وإذا كانت مرافق التخزين المركزي مملوكة للحكومة الفيدرالية فسيسمح ذلك لوزارة الطاقة بالوفاء بالتزامها تسلم الوقود المستنفد من مشغلي محطات الطاقة النووية.[6] وبهذا تخفض الحكومة الفيدرالية التزاماتها الكلية تجاه الصناعة، وربما توفر على دافعي الضرائب مليارات من الدولارات التي ستدفع إلى مالكي محطات الطاقة النووية.

قُدمت اقتراحات كثيرة لبناء مرافق للتخزين المركزي المؤقت في أوقات مختلفة خلال العقود القليلة الماضية. كما حاول مكتب التفاوض بشأن النفايات النووية تحديد موقع لاستضافة منشأة التخزين المؤقت بعد تعديل قانون سياسة النفايات النووية عام 1987. وعلى مر السنين، عبر عدد من القبائل الأمريكية الأصلية عن رغبة في استضافة موقع للتخزين المؤقت، برغم عدم النجاح في تطبيق أي من الاقتراحات حتى الآن بسبب معارضة الولايات المجاورة.

وتشير تقديرات وزارة الطاقة إلى أنه إذا وُجِدت حلول سريعة للمشكلات القانونية والتنظيمية والمالية ومشكلات تحديد الموقع والبناء، فربما تكون منشأة التخزين المركزي جاهزة لاستقبال النفايات النووية خلال ست سنوات من بدء عملية البناء. ولكن الكثير من الخبراء يرون أن عملية اختيار الموقع وبناء المنشأة وتجهيزها للعمل سيستغرق ما بين 17 و33 سنة (GAO, 2009). وقد يكون العمر الفعال لمنشأة التخزين المؤقت 100 سنة أو أكثر (Bunn, Holdren, et al., 2001).

تقويم التخزين المركزي المؤقت

التخزين المركزي المؤقت لا يلغي الحاجة إلى تطوير خيار للتخلص من النفايات على المدى الطويل، ولكن قد تكون له فوائد أخرى. نناقش في هذا القسم الجوانب الإيجابية والسلبية المحتملة للانتقال إلى التخزين المركزي المؤقت، وذلك بالاعتماد إلى حد كبير على

دراســة أجرتهــا مجموعــة دراســة الطاقــة النوويــة التابعــة للجمعيــة الفيزيائيــة الأمريكيـة (Nuclear Energy Study Group of the American Physical Society, 2007) تتضمن تحليلاً عميقاً للقضايا المتصلة بتطوير التخزين المؤقت.

السلامة: يتطلب تخزين الوقود المستنفد في مواقع مركزية محددة تعزيز البنـى التحتيـة والإجراءات من أجل حماية الكميات الكبيرة مـن النفايـات التـي تتجـاوز في حجمهـا الكميات التي تخزن عادة في مواقع المحطات النووية، وسيكون لهذا فوائـد عـلى صـعيد السلامة. ولكن تحليل هذه الفوائد يشير إلى أنها ستكون على الأرجح صغيرة. فعلى سـبيل المثــال، وجــدت مجموعــة دراســة الطاقــة النوويــة التابعــة للجمعيــة الفيزيائيــة الأمريكيـة (Nuclear Energy Study Group of the American Physical Society, 2007, p. i) أنه «ليس هناك أسباب جوهرية تتعلـق بالـسلامة أو الأمـن تـستدعي إنـشاء مرافق للتخزين المركزي المؤقت». وهذا لأن تقنيـات التخـزين ذاتهـا تـستخدم في مواقـع المحطات النووية وخارجها، كما أن متطلبات التشغيل والصيانة والأمن هي ذاتها في حالـة التخزين في الموقع وفي حالة التخزين المركزي.

ويتطلب التخزين المركزي المؤقت بشكل عام، نقل الوقود النووي مـرتين: مـرة مـن محطة الطاقة إلى موقع التخزين المؤقت، ومرة من موقع التخزين المؤقت إلى موقع التخلص الجيولوجي الدائم. والاستثناء الوحيد هو عندما يكون مرفق التخزين المؤقت موجـوداً في موقع التخلص الجيولوجي الدائم نفسه. عند المقارنة بين التخزين المركزي المؤقت وغـيره من خيارات إدارة النفايات النووية، فإن مسائل السلامة تعتمد بالدرجة الأولى على مـدى ما تمثله هذه الحاجة الإضافية إلى النقل مـن مخـاطر إشـعاعية إضـافية. وبنـاء عـلى تحليـل المخاطر المحتملة، إلى جانب التجارب الوطنية والدولية في نقل الوقـود المستنفد، خلـص المجلس الوطني للبحوث (National Research Council, 2006, p. 7) إلى ما يأتي:

> إن النقل على الطرق السـريعة (في حالة [عشـرات الأطنان]) وبواسطة السكك الحديديـة (في حالة [من مئات إلى آلاف من الأطنان]) هو، من وجهة نظر تقنية، عملية ذات مخاطر إشعاعية منخفضة ويمكن السيطرة على آثارها في السلامة والصحة والبيئة عندما تتم مع التقيد الصارم باللوائح الحالية.[7]

وقد خلص الكثير من الدراسات الأخرى إلى نتائج مماثلة، كما لاحظت مجموعة دراسة الطاقة النووية التابعة للجمعية الفيزيائية الأمريكية (Nuclear Energy Study Group of the American Physical Society, 2007).

الأمن: معظم الدراسات التي حللت القضايا الأمنية المرتبطة بالانتقال إلى التخزين المؤقت تشير إلى أن المخاطر يرجح أن تكون صغيرة جداً وتنبع أساساً من التهديدات التي تحدث خلال نقل الوقود المستنفد. ولا توجد دراسات غير سرية تحدد مخاطر النقل أو تحللها بشكل جيد.[8]

العقبات التقنية: التخزين المركزي المؤقت ممكن من الناحية التقنية باستخدام البراميل الجافة المستخدمة حالياً. وقد استخدمت بعض الأساليب لشحن الوقود النووي والنفايات العالية الإشعاع، وإن كان في عدد محدود من الحالات في الولايات المتحدة. لذلك لا يبدو أن هناك أي حواجز تقنية ملموسة في وجه الإنشاء والتشغيل لمنشأة تخزين مركزي مؤقت واحدة أو أكثر. وإذا لزم في المستقبل إعادة تغليف الوقود المستنفد المخزن في البراميل الجافة، فقد يكون لوجود كميات كبيرة منها في موقع واحد ميزات تقنية تتعلق بوفورات الحجم.

قبول الرأي العام: بينما يعد التخزين المركزي المؤقت أمراً سهلاً من الناحية التقنية، فإنه يواجه عدداً من العقبات الناجمة عن الجوانب المتعلقة بقبول الرأي العام. فتاريخ محاولات إنشاء مواقع لتخزين النفايات النووية أو التخلص منها، بما في ذلك المواقع المصممة لقبول نفايات ذات مستوى إشعاعي منخفض، يبين بوضوح أنه لكي تقبل الولاية المضيفة والمجتمعات المحلية المضيفة إنشاء تلك المواقع يجب أن تكون الفوائد المحلية والإقليمية، مثل توفير فرص العمل وتطوير شبكة المواصلات والفوائد المباشرة، أكبر من المخاطر البيئية المتصورة ومخاطر السلامة التي قد تؤدي إلى انخفاض قيمة العقارات. وحتى الآن لم تقبل إلا قلة من قبائل الهنود الأمريكيين اقتراحات استضافة مواقع التخزين المؤقت، برغم أن معارضة وكالات أو فئات متضررة أخرى حالت دون تنفيذ هذه الاقتراحات.[9] وينبع بعض هذه المخاوف من خشية أن يتحول مرفق التخزين المؤقت المقترح إلى مرفق دائم، أو

على الأقل يستخدم لفترة أطول بكثير مما كان متوقعاً أصلاً. وهناك مخاوف أخرى تنبع من قضايا السلامة المرتبطة بنقل الوقود النووي المستنفد وتخزينه.

التكلفة: قد يسمح تجميع النفايات بتفكيك المواقع التي سبق إغلاقها، وهذا قد يحقق بعض التوفير في التكاليف بالنسبة إلى ملاك المحطات النووية ويجعل الأرض متاحة لأغراض أخرى. وإذا تم التخلي عن عدد كبير من محطات الطاقة النووية القائمة خلال السنوات الخمسين المقبلة، فقد يؤدي الانتقال إلى منشأة تخزين مركزية إلى خفض ملحوظ في التكاليف الكلية للأمن والصيانة. ولكن مقابل هذا التوفير ستكون هناك تكاليف إضافية لتطوير المرافق المركزية ونقل الوقود المستنفد إليها. وإذا أخذنا كلاً من التوفير والتكاليف الإضافية بالحسبان، فمن غير الواضح إن كان التخزين المركزي المؤقت سيحقق على المدى الطويل توفيراً أكثر من الاعتماد على التخزين في الموقع أو لا. وتشير التقديرات الحديثة إلى أن تكلفة تنفيذ حل التخزين المركزي لمدة 100 سنة هي مقاربة لتكاليف التخزين في الموقع (GAO, 2009).

دورات الوقود المتقدمة

دورة الوقود النووي هي سلسلة من النشاطات التي تدخل في عملية إنتاج الوقود اللازم لتوليد الطاقة النووية واستخدامه والتخلص منه. وبما أن اختيار دورة الوقود يؤثر في نوعية النفايات الناتجة من توليد الطاقة النووية، فهو عامل مركزي يجب أخذه في الحسبان عند معالجة القضايا المتعلقة بالتخلص من النفايات النووية. ولكن بما أن لدورة الوقود آثاراً مهمة في إدارة موارد الوقود الرئيسية وتصميم المفاعلات والسلامة والأمن، فمن الصعب دراسة دورة الوقود النووي في سياق إدارة الوقود المستنفد وحدها.

قد تتخذ دورة الوقود النووي أشكالاً محتملة عدة. ففي الشكل الأبسط، يصنع الوقود الجديد من اليورانيوم الطبيعي المخصب، ويُحرق في مفاعل حراري لئلا يعود مصدراً فعالاً للطاقة، ثم يتم التخلص منه بشكل مباشر. تسمى هذه الدورة بالدورة المفتوحة أو دورة المرة الواحدة لأنه لا تجري إعادة تدوير أي جزء من الوقود، برغم أن الوقود المستنفد يحتوي على إمكانات طاقة كبيرة. وهذه الدورة هي المستخدمة حالياً في

جميع المفاعلات النووية التجارية في الولايات المتحدة. وفي الطرف المقابل، يمكن من حيث المبدأ، إعادة تدوير الوقود المستنفد مرات عدة، بحيث يُستهلك كامل اليورانيوم الأولي وجميع العناصر الأثقل من اليورانيوم (تسمى مجتمعة الأكتينيدات Actinide) التي ينتجها المفاعل. تسمى هذه الدورة بالدورة المغلقة كلياً لأنها تستهلك كامل الطاقة الكامنة في الوقود الأولي (NEA, 2006)، ولكنها تُنتج أيضاً نفايات ناتجة من الانشطار يجب التخلص منها بوصفها نفايات عالية الإشعاع. وبطبيعة الحال فإن دورة الوقود المغلقة أكثر تعقيداً من الدورة المفتوحة لأنها تتطلب تصميمات مفاعلات متقدمة تقنياً لاستهلاك الأكتينيدات وربما طرائق كيميائية معقدة لعزل مختلف العناصر في الوقود المستنفد. ولا بد من بذل جهود بحث وتطوير إضافية كبيرة قبل التأكد من الجدوى البيئية والتقنية والتجارية للدورة المغلقة كلياً.

وبين هذين الطرفين، هناك عدد من الدورات الوسيطة الممكنة. في إحداها يُعالج الوقود المستنفد من المفاعل الحراري لاسترداد البلوتونيوم الناتج خلال التفاعل، ثم يخلط البلوتونيوم مع اليورانيوم الطبيعي أو المنضب[10] لإنتاج وقود موكس MOX (مزيج من الأكاسيد) الذي يعاد تدويره في المفاعلات الحرارية. ونظراً إلى أن وقود موكس المستنفد يحتوي مستوى عالياً من الإشعاع والحرارة، بالإضافة إلى تراكم إنتاج نظائر اليورانيوم والبلوتونيوم غير المرغوب فيها، فإن إعادة التدوير بهذا الأسلوب مجدية لمرة واحدة فقط (IAEA, 2005)، ومن هنا أطلق عليها اسم إعادة التدوير مرة واحدة. ويجب التخزين أو التخلص من وقود موكس المستنفد، فضلاً عن نواتج الانشطار واليورانيوم المتبقي المعزول عن الوقود المستنفد الأصلي.

الطريقة المتبعة في المعالجة التقليدية للوقود المستنفد هي إعادة التدوير لمرة واحدة، وهي معتمدة في العمليات التجارية في مفاعلات الطاقة النووية المدنية منذ أكثر من 50 عاماً. وحالياً تشغل فرنسا والمملكة المتحدة وروسيا واليابان والهند منشآت تعيد معالجة الوقود المستنفد لغرض إنتاج وقود موكس. وفي بعض الحالات تتعاقد معها بلدان أخرى لإعادة معالجة الوقود المستنفد (IAEA, 2005). ولا يوجد حتى الآن نظام أكثر تقدماً من إعادة التدوير لمرة واحدة وصل إلى مرحلة التشغيل التجاري (IAEA, 2005).

وعلى الرغم من التطبيق التجاري المبكر لنظم إعادة التدوير مرة واحدة، فقد اعتمدت بلدان كثيرة – ومن بينها الولايات المتحدة – سياسة دورة الوقود المفتوحة. والجزء من الوقود المستنفد الذي تتم معالجته ويعاد تدويره كوقود موكس صغير جداً؛ حيث إن أكثر من 90٪ من الطاقة الكهربائية المولدة عن طريق الطاقة النووية في جميع أنحاء العالم تولد في محطات تطبق دورة الوقود المفتوحة (MIT, 2003). ويُعزى عدم شيوع إعادة التدوير إلى أسباب متنوعة. وعملية إعادة معالجة الوقود المستنفد وتدويره تؤثر في جوانب كثيرة من دورة الوقود النووي، وقد يكون لها فوائد محتملة وعيوب في الوقت ذاته. ومع اكتساب الخبرة وتغير الظروف، يتغير الثقل النسبي لهذه الفوائد والعيوب. ومن أهم الجوانب المتصلة بإعادة معالجة الوقود المستنفد: إمدادات اليورانيوم، وانتشار الأسلحة النووية، وإدارة النفايات.

موارد اليورانيوم

السبب الرئيسي لإعادة معالجة الوقود النووي المستنفد هو استرجاع البلوتونيوم الناتج من التفاعل لإعادة تدويره إلى وقود جديد. وعندما ظهرت الطاقة النووية التجارية لأول مرة في خمسينيات القرن العشرين، كان ينظر إلى إعادة تدوير الوقود النووي المستنفد في مفاعلات سريعة بوصفها الاستراتيجية القياسية (IAEA, 2005). كانت التوقعات تشير إلى نمو سريع للطاقة النووية في الولايات المتحدة، وصولاً إلى توليد 1,000 جيجا واط من الكهرباء بحلول عام 2000 (U.S. Atomic Energy Commission, 1972). وتغذية هذه المفاعلات بالوقود تتطلب كميات كبيرة من اليورانيوم. وفي ظل الشكوك الكبيرة حول موارد اليورانيوم الخام وأسعاره، كان يُنظر إلى إعادة تدوير الوقود المستنفد بوصفها عملية أساسية لضمان وجود إمدادات كافية من المواد الانشطارية للمفاعلات. وبالإضافة إلى ذلك، كانت تقنيات المعالجة متطورة قبل ظهور الطاقة النووية نتيجة لجهود عزل البلوتونيوم من أجل صنع السلاح النووي خلال الحرب العالمية الثانية وبعدها (Jackson, 2003; IAEA, 2005). لذلك كان يُنظر إلى المفاعلات النووية وإعادة معالجة الوقود المستنفد؛ بوصفها جزءاً أساسياً من التكنولوجيا النووية، وقد أسهم ذلك في الميل نحو استخراج المواد الانشطارية من الوقود المستنفد.

ولكن أسعار اليورانيوم بقيت منخفضة نسبياً مع استمرار اكتشاف مصادر جديدة لليورانيوم الخام واستغلالها (Jackson, 2003; IAEA, 2005). وبالإضافة إلى ذلك، تبين أن الافتراضات السابقة حول نمو الطاقة النووية كانت مفرطة في التفاؤل. ففي عام 2008 بلغت استطاعة توليد الكهرباء بالاعتماد على الطاقة النووية في الولايات المتحدة 100 جيجا واط فقط (NEA, 2009b)؛ أي عشر ما كان متوقعاً قبل عقود. لذلك كان الطلب على اليورانيوم أقل بكثير مما كان متوقعاً في السابق. وهكذا فإن المحافظة على موارد اليورانيوم ليس مسوغاً مقنعاً لإعادة معالجة الوقود المستنفد، على الأقل في هذا الوقت. وقد يقول قائل إن البلدان التي تفتقر إلى موارد كبيرة لليورانيوم الطبيعي أو ليس لها علاقات ودية مع الدول التي تمتلك تلك الموارد، تمتلك الدافع إلى إعادة معالجة الوقود المستنفد، ولكن هذا لا ينطبق على الولايات المتحدة.

خطر انتشار الأسلحة النووية

من النتائج السلبية لإعادة معالجة الوقود المستنفد احتمال زيادة مخاطر انتشار الأسلحة النووية. فهناك خشية من إمكانية تحويل البلوتونيوم المعزول من النفايات المعالجة واستخدامه في صنع أسلحة نووية. وفي الواقع فإن تكنولوجيا إعادة المعالجة صممت في الأصل خصيصاً لهذا الغرض. وبرغم أن التركيب النظيري للبلوتونيوم المعزول من الوقود النووي المستنفد التجاري (أو ما يسمى البلوتونيوم المستخدم في مفاعلات الطاقة) يجعله دون مستوى البلوتونيوم المستخدم في صنع الأسلحة النووية، فمن الواضح أنه مايزال بالإمكان استخدامه لصنع أسلحة نووية (Mark, 1990; U.S. Congress Office of Technology Assessment, 1993; National Academy of Sciences, 1994). وفي الواقع أجرت وزارة الطاقة في عام 1962 تجربة ناجحة لسلاح نووي مصنوع من البلوتونيوم المستخدم في مفاعلات الطاقة (DOE, 2010d).

أدى القلق من مخاطر انتشار السلاح النووي إلى جعل الولايات المتحدة تعتمد في عام 1977 سياسة لتأجيل إعادة التدوير التجاري للبلوتونيوم إلى أجل غير مسمى (J. Carter, 1977). وتوقفت صناعة إعادة المعالجة التجارية في الولايات المتحدة التي

كانت تعاني ضعفاً في الأداء ومشكلات في التوافـق التنظيمـي (Jackson, 2003; Union of Concerned Scientists, 2008; Gillette, 1974)، ولم تشهد الولايات المتحـدة منـذ ذلك الحين أي إعادة معالجة تجارية. وعلى الرغم من جهود الولايـات المتحـدة لإقنـاع بقية دول العالم بأن تحذو حذوها، فماتزال بلدان عدة تقوم بإعادة المعالجة. ومنـذ ذلـك الوقت أجرت الولايات المتحدة بحوثاً واسعة لتطـوير دورات وقـود متقدمـة للطاقـة النووية. وهناك جهود دولية أخرى تسعى إلى تحقيق أهداف مماثلة (IAEA, 2005). ومـن أهم معايير التصميم لهذه البحوث هو أن أي طرائق جديدة لإعادة معالجة الوقود المستنفد يجب أن تقلل من مخاطر انتشار الأسلحة النووية (مثلاً DOE, 2010c). وعلى الـرغم مـن دراسة الكثير من المفاهيم التقنيـة الجديـدة، فماتـزال هـذه الجهـود في مراحـل البحـث أو التطوير، ويتوقع أن تبقى كذلك طوال عقود عدة، قبل أن يصبح بالإمكان تطبيقها تجاريـاً (IAEA, 2005; NEA, 2006).

إدارة النفايات

مع تزايد صعوبات إيجاد حل دائم لمـشكلة الـتخلص مـن النفايـات النوويـة، بـدأ الاهتمام بإعادة المعالجة يتحـول عـن مراحـل دورة الوقـود النـووي إلى إدارة النفايـات النووية في نهاية تلك الدورة. وبعد أن كان يُنظر إلى إعـادة تـدوير الوقـود المـستنفد مـن منظور المحافظة على موارد الوقود في المقام الأول، صار ينظر إليها بـشكل متزايـد، مـن حيث قدرتها على الحد بشكل كبير من متطلبات سعة مستودع التخلص النهائي. ولكـن هذا ليس أمراً مفروغاً منه، لأن كمية النفايات وخصائص دورة الوقود المتقدمـة تعتمـد على الخيارات التكنولوجية والقرارات التنفيذية. كما لن يكـون لـدورة الوقـود المتقدمـة فائدة تذكر، من حيث الحد من تعرض المحيط الحيوي للإشعاع على المدى الطويل. هذه هي النقاط التي سنناقشها في هذا القسم.

إن كيفية تأثير معالجة الوقـود النـووي وإعـادة تـدويره في متطلبـات الـتخلص مـن النفايات، تعتمدان على تفصيلات النظام كله. وبصفة عامة، يوفر تقسيم الوقـود المـستنفد

إلى مكونات منفصلة مرونة في إدارة النفايات لأنه يسمح بمعاملة المكونات المختلفة التي لكل منها خصائص ومتطلبات تخلص مختلفة بشكل منفصل، بما في ذلك إعادة تدويرها إلى وقود جديد. فالوقود النووي المستنفد يتكون بشكل عام من ثلاثة عناصر، هي: اليورانيوم، ونواتج الانشطار (المكون الرئيسي للنفايات العالية الإشعاع)، وعناصر ما بعد اليورانيوم (بالدرجة الأولى البلوتونيوم، ولكن هناك أيضاً كميات صغيرة من النبتونيوم والأمريسيوم والكوريوم).[11] وتعتمد النسب الدقيقة لهذه المكونات على مدى تخصيب اليورانيوم الأولي واستهلاك الوقود في المفاعل، ولكن عادة ما يكون 95٪ من وزنها من اليورانيوم، و4٪ من نواتج انشطار، و1٪ من عناصر ما بعد اليورانيوم (Bodansky, 1996; Jackson, 2003; MIT, 2003).

لتوضيح كيفية تأثير دورة الوقود في نسب مختلف المكونات في النفايات، نبين في الجدول (2-2) كميات النفايات السنوية التي سجلها معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (MIT, 2003) لثلاث دورات وقود هي دورة الوقود المفتوحة وإعادة التدوير لمرة واحدة والدورة المغلقة "المتوازنة". والدورة المغلقة المبينة هنا تجمع ما بين المفاعلات الحرارية والسريعة، بحيث يتم استهلاك جميع عناصر ما بعد اليورانيوم المنتجة في المفاعلات الحرارية في المفاعلات السريعة.[12] وهي ليست "أنقى" دورة وقود مغلقة؛ إذ إنها تُخلّف كمية كبيرة من اليورانيوم المتبقي برغم استهلاك جميع عناصر ما بعد اليورانيوم. وبإمكان دورة استنسال [توليد] نقية تتكون من مفاعلات استنسال سريع فقط أن تستهلك – نظرياً – جميع اليورانيوم الأولي وعناصر ما بعد اليورانيوم المنتجة (NEA, 2006). وبينما تساعد هذه الدورة في خفض الطلب على اليورانيوم الخام دون أن تخلف أي يورانيوم متبقٍ، فهي مماثلة تماماً لدورة الوقود المغلقة المتوازنة من جميع النواحي الأخرى المتعلقة بإدارة النفايات (NEA, 2006). ولا بد من الإشارة إلى أن القيم الواردة في الجدول (2-2) هي لإنتاج 500 جيجا واط؛ أي خمسة أضعاف الاستطاعة الحالية لتوليد الكهرباء من الطاقة النووية في الولايات المتحدة.

الجدول (2-2)

كميات الوقود المستخدمة والنواتج في دورات الوقود النووي المختلفة

البيـــــان	الدورة المفتوحة	إعادة التدوير لمرة واحدة	الدورة المغلقة[أ]
الوقود المستخدم			
اليورانيوم الخام (10^3 أطنان معدن ثقيل/ سنة)	102	85.7	55.3
وقود أكسيد يورانيوم جديد (10^3 أطنان معدن ثقيل/ سنة)	9.97	8.37	5.40
وقود موكس أو مفاعل سريع جديد (10^3 أطنان معدن ثقيل/ سنة)[ب]	0	1.59	1.56
النواتج			
يورانيوم معزول (10^3 أطنان معدن ثقيل/ سنة)[ج]	—	7.80	4.77
وقود مستنفد (10^3 أطنان معدن ثقيل/ سنة)	9.97	1.59	0
نفايات عالية الإشعاع (10^3 أطنان معدن ثقيل/ سنة)	0	0.44 [د]	0.47 [د]

المصدر: أخذت القيم من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (MIT, 2003)، وعُدلت لتتناسب مع 500 جيجا واط؛ (أي خمسة أضعاف الاستطاعة الحالية لتوليد الكهرباء من الطاقة النووية في الولايات المتحدة).

(أ) دورة الوقود المغلقة المتوازنة من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (MIT, 2003).

(ب) منتج من إعادة تدوير الوقود المستنفد.

(ج) ربما لا يحتاج اليورانيوم المعزول إلى التخلص منه في مستودع جيولوجي عميق.

(د) تؤدي إعادة تدوير الوقود المستنفد إلى إنتاج كميات كبيرة من النفايات المشعة التي يتطلب بعضها التخلص منه، في مستودع جيولوجي عميق.

تبين الأرقام الواردة في الجدول (2-2) نقاطاً مهمة عدة. أولاً - كما لوحظ في دراسات سابقة - تُستخدم في دورة إعادة التدوير لمرة واحدة، الكمية نفسها تقريباً من اليورانيوم الخام المستخدمة في الدورة المفتوحة (أقل بحوالي 16٪). ونظراً إلى الفائدة المحدودة التي تقدمها إعادة التدوير لمرة واحدة، من حيث المحافظة على اليورانيوم فقد كان يُنظر إليها دائماً على أنها خطوة مؤقتة نحو دورة وقود مغلقة بشكل كامل (Holt, 2008). أما بالنسبة إلى دورة الوقود المغلقة المتوازنة فهي تقلل من استهلاك اليورانيوم الخام بشكل أكبر (46٪). ولكن كما سبق القول، مازال اليورانيوم الخام رخيصاً ومتوافراً بكثرة، ولا يعد عائقاً في وجه الطاقة النووية.

النقطة الثانية التي يبينها الجدول (2-2) هي الاختلاف الكبير بين دورات الوقود، من حيث كمية النفايات. وهناك ناحية مهمة ماتزال غامضة بالنسبة إلى حجم النفايات، وهي أن مصير اليورانيوم المعزول من الوقود المستنفد خلال المعالجة (ويشار إليه باليورانيوم المعزول أو اليورانيوم المعالج) ليس واضحاً تماماً. فإعادة تدوير اليورانيوم المعزول وتخصيبه ليصبح وقوداً جديداً عمليتان مكلفتان وصعبتان تقنياً بسبب التلوث بنظائر اليورانيوم غير المرغوب فيها، والأكتينيدات الثانوية، ونواتج الانشطار (IAEA, 2009b). لذلك، بينما تمت إعادة تدوير بعض اليورانيوم المعزول، فقد خُزّن معظمه إلى أن تصبح إعادة التدوير مجدية أكثر، من حيث التكلفة أو يصبح بالإمكان التخلص منه (IAEA, 2007a, 2009b; Davis, 2009). ولا يوجد في الولايات المتحدة وغيرها من الدول التي تستخدم الطاقة النووية ممارسات أو سياسات خاصة بإدارة اليورانيوم المعزول؛ وفي خارج الولايات المتحدة تُترك القرارات عادة لشركات المرافق (IAEA, 2009b). واليورانيوم المعزول أقل إشعاعاً بكثير من النفايات العالية الإشعاع أو الوقود النووي المستنفد؛ ما يعني أنه في حالة عدم تدويره ربما يمكن التخلص منه بشكل منفصل عن هذه المكونات الأخرى. وأحد الاحتمالات هو إمكانية الموافقة على التخلص منه في مستودع جيولوجي قليل العمق، وربما إعادته إلى المناجم التي استُخرج منها اليورانيوم الخام في الأصل (IAEA, 2007a; NEA, 2006). وربما تسمح بعض دورات الوقود الأكثر تقدماً التي تجري دراستها حالياً بعزل اليورانيوم بدرجة نقاء تسمح بتدويره بسهولة أو التخلص منه كنفايات منخفضة الإشعاع (DOE, 2006).

إذا لم يكن اليورانيوم المعزول يحتاج إلى التخلص منه في مستودع جيولوجي عميق، فهذا يعني أن إعادة تدوير الوقود لمرة واحدة تقلل بشكل كبير كمية النفايات التي يلزم التخلص منها في مستودع جيولوجي عميق (حوالي 80٪). كما أن دورة الوقود المغلقة تقلل متطلبات النفايات بنسبة أكبر (حوالي 95٪). ولكن مقدار تقليل النفايات لا يعني تخفيضاً مماثلاً في سعة المستودع الجيولوجي الدائم. فحجم المستودع يتحدد إلى حد كبير بناء على الحمل الحراري الناتج من النفايات المخزنة فيه، لأنه تجب المباعدة بين كتل النفايات بما يكفي للسماح بتبدد الحرارة (انظر مثلاً: Chow and Jones, 1999; NEA, 2006). وكمية نواتج الانشطار العالية الإشعاع في النفايات الناتجة من إعادة تدوير الوقود مرة واحدة ودورة الوقود المغلقة مماثلة أساساً لكميتها في النفايات الناتجة من دورة الوقود

المفتوحة (MIT, 2003). وبما أن معظم الحرارة يصدر في البداية من نواتج الانشطار، فليس هناك فارق كبير بين الحمل الحراري الأولي من الوقود المستنفد الكامل (من دورة الوقود المفتوحة) والنفايات العالية الإشعاع المعزولة (من الدورة المغلقة أو إعادة التدوير لمرة واحدة) برغم أن الثانية حجمها أقل بكثير؛ ومن ثم فإنه في حالة النفايات التي توضع في المستودع خلال خمسين سنة تقريباً من إزالتها من المفاعل، لا توفر دورة الوقود المغلقة أو إعادة تدوير الوقود لمرة واحدة فائدة تذكر، من حيث تقليل السعة اللازمة للمستودع الجيولوجي الدائم (NEA, 2006).

في حالة دورة الوقود المغلقة، سيكون من الممكن تقليل الحمل الحراري على المستودع بشكل كبير عن طريق ترك النفايات العالية الإشعاع لتبرد فترة طويلة قبل التخلص منها. فعدم وجود عناصر ما بعد اليورانيوم في نفايات دورة الوقود المغلقة يؤدي إلى برودتها بشكل أسرع من النفايات الناتجة من دورة الوقود المفتوحة أو إعادة تدوير الوقود لمرة واحدة. وبعد التبريد لمدة 200 سنة، ستكون الحرارة المتولدة من نفايات الدورة المغلقة أقل بمقدار 18 مرة من النفايات الناتجة من دورة الوقود المفتوحة أو إعادة تدوير الوقود لمرة واحدة (NEA, 2006). وهذا الانخفاض في الحمل الحراري يسمح بوضع النفايات أقرب إلى بعضها بعضاً، ما يجعل حجم المستودع أصغر بكثير.

أحد الاعتبارات الإضافية التي يجب أخذها في الحسبان فيما يتعلق بحجم النفايات هو أن إعادة معالجة الوقود المستنفد تؤدي إلى إنتاج كميات كبيرة من النفايات المعمرة ذات الإشعاع المنخفض والمتوسط (مثل المخلفات الكيميائية ومعدات المعالجة والملابس الواقية الملوثة بعناصر ما بعد اليورانيوم)[13] التي يجب أيضاً التخلص منها في مستودعات جيولوجية (NEA, 2006; MIT, 2003; M. Schneider and Marignac, 2008; Davis, 2009). وحجم هذه النفايات في حالة الدورة المغلقة وإعادة التدوير لمرة واحدة قد يكون أكبر من حجم النفايات العالية الإشعاع (NEA, 2006).

النقطة الثالثة التي نستنتجها من البيانات الواردة في الجدول (2-2) هي أن اختيار دورة الوقود يؤثر في مستوى النشاط الإشعاعي للنفايات التي توضع في مستودع

جيولوجي دائم ولكن ليس له في نهاية المطاف تأثير يذكر في مخاطر المستودع على السلامة والبيئة على المدى الطويل. ففي دورة الوقود المغلقة، تُستهلك جميع عناصر ما بعد اليورانيوم في المفاعل، وتبقى فقط نواتج الانشطار ونفايات المعالجة بحاجة إلى التخلص منها في مستودع جيولوجي عميق. في البداية تكون نواتج الانشطار هي العنصر الأكثر إشعاعاً في الوقود المستنفد، ويصدر منها معظم النشاط الإشعاعي خلال السنوات المائتين الأولى. وبعد ذلك تصبح عناصر ما بعد اليورانيوم التي تعمر مدة أطول هي المسؤولة عن معظم النشاط الإشعاعي (MIT, 2003). لذلك فإن إزالة عناصر ما بعد اليورانيوم من النفايات تقلل بدرجة كبيرة من نشاطها الإشعاعي على المدى الطويل. فبعد ألف سنة يكون النشاط الإشعاعي لنفايات دورة الوقود المغلقة قد انخفض إلى أقل من 1٪ بالمقارنة إلى النفايات الناتجة من دورة الوقود المفتوحة أو إعادة تدوير الوقود لمرة واحدة (NEA, 2006). وهذا يقلل بدرجة كبيرة من المخاطر المرتبطة بحدوث تماس مباشر مع النفايات، كأن يحدث خرق غير مقصود لجدار مستودع النفايات في المستقبل البعيد.

تقاس مخاطر النفايات في المستودع الجيولوجي الدائم على السلامة والبيئة باستخدام جرعة الإشعاع السنوية المؤذية التي يتعرض لها عضو عادي من المجموعة المتأثرة بالمستودع. والجرعة عبارة عن دالة مركبة تتكون من كميات النويدات المشعة المختلفة الموجودة في كل نقطة زمنية وأداء المستودع والحركية البيئية لكل واحد من العناصر (NEA, 2006). وقد تبين أن الحركية البيئية عامل حاسم بشكل خاص بسبب الاختلاف الكبير في الحركية النسبية لمختلف العناصر. وعلى وجه الخصوص فإن عناصر ما بعد اليورانيوم أقل حركية بكثير من الكثير من العناصر في نواتج الانشطار. لذلك فإن بعض نواتج الانشطار المعمرة تسهم في الجرعة بنسبة أكبر بكثير من إسهامها في النشاط الإشعاعي الكلي. على سبيل المثال، في معظم الحالات تكون نواتج الانشطار المعمرة؛ مثل: اليود 129 والتكنيتيوم 99، هي المكون الأهم في حساب الجرعة لمدة مائة ألف سنة أو أكثر؛ أي بعد مرور فترة طويلة على انخفاض مستويات نشاطها إلى ما دون مستوى نشاط عناصر ما بعد اليورانيوم المعمرة (NEA, 2006; MIT, 2003). ولذلك، وبرغم أن دورة

الوقود المغلقة تزيل عناصر ما بعد اليورانيوم من النفايات وتقلل من الإشعاع الكلي بـأكثر من 90٪، فإن انخفاض الجرعة يكون أقل بكثير.

خلاصة القول، هي أنه بإمكان دورة الوقـود المغلقـة أن تقلـل إلى حـد كبـير الـسعة اللازمة للمستودع الجيولوجي الدائم إذا ما تُركت النفايات العالية الإشعاع لتبرد بالشكل الكافي على سطح الأرض قبل وضعها في المستودع. ولكن في معظـم الحـالات لـن تكـون لدورة الوقود المغلقة فائدة تذكر، من حيث تقليل مخاطر تلك النفايات على صحة الإنسان والبيئة على المدى الطويل.

تقويم دورات الوقود المتقدمة

هناك – كما رأينا سابقاً – الكثير من الأشكال الممكنة لدورات الوقود المتقدمة. وبنـاء على المناقشة السابقة، من الواضح أن إعادة التدوير لمرة واحدة لا تـوفر فائـدة تـذكر، مـن حيث المحافظة على اليورانيوم الخام أو خفض الـسعة اللازمـة للمـستودع الجيولـوجي أو الحد من المخاطر البيئية. كما أنها تمثل خطراً، من حيث تسهيلها انتـشار الـسلاح النـووي، وهو أمر تعده الولايات المتحدة غـير مقبـول. لـذلك، مـن المـستبعد أن تطبـق الولايـات المتحدة الدورة التجارية الحالية لإعادة تدوير الوقود مرة واحدة. وسنركز في الجزء المتبقـي من هذا التقويم، على دورة الوقود المغلقة فقط.

تعد إعادة معالجة الوقود المستنفد الخطـوة الأكثـر تعقيـداً في دورة الوقـود النـووي. فرصد النشاطات والمواد وتقويم الثغرات الأمنيـة وتنفيـذ الإجـراءات الاحتياطيـة أكثـر صعوبة في مرحلة إعادة المعالجة بالمقارنة إلى غيرها من مراحـل دورة الوقـود. وإلى جانـب ذلك فإن الخبرة في المعالجة على نطاق تجاري تُقصر على نظم إعادة التدوير لمرة واحدة. ولا يُعرف سوى القليل عن طرائق المعالجـة الأخـرى وتـصنيع الوقـود وتكنولوجيـا مفاعـل الاستنسال الـسريع التي ستلزم في دورة الوقود المغلقة أكثر. ولهذه الأسـباب، فـإن هنـاك شكوكاً كبيرة تحيط بنواحي السلامة والأمـن والآثـار الأخـرى لـدورات الوقـود الأكثـر تقدماً. وفي بعض المواضع نصل إلى استنتاجات حول دورات الوقود المتقدمة اعـتماداً عـلى تجارب المعالجة التقليدية.

السلامة: هناك مخاوف محتملة عدة، بشأن السلامة تتعلق بدورات الوقود المتقدمة أهمها: زيادة نقل الوقود المستنفد والنفايات العالية الإشعاع، وآثار عمليات المعالجة وتصنيع الوقود في البيئة والجمهور وسلامة العمال، والمخاوف من تأثير المفاعلات النووية السريعة في السلامة. وقد سبقت الإشارة إلى أن نقل الوقود النووي المستنفد والنفايات العالية الإشعاع في الولايات المتحدة يخضع للوائح صارمة لضمان المحافظة على السلامة. أما في أوروبا؛ حيث تقدم فرنسا والمملكة المتحدة خدمات المعالجة لبلدان عدة أخرى، فقد تم نقل الوقود المستنفد والنفايات العالية الإشعاع على نطاق واسع، من دون وقوع أي حوادث تؤثر في السلامة.

تتضمن التأثيرات البيئية لطرائق المعالجة المائية التقليدية تسرب الغازات المشعة والسوائل والمواد الصلبة، فضلاً عن المواد الكيميائية السامة والمذيبة والقابلة للاشتعال (IAEA, 2005; Jackson, 2003; M. Schneider and Marignac, 2008). وتتميز دورات الوقود الأكثر تقدماً، عند مقارنتها إلى الدورات المفتوحة، بنفايات أكثر تعقيداً تتضمن نواتج مؤقتة ونفايات أكثر حركية، ما يزيد من خطر إلحاق أضرار بالبيئة على المدى القصير. وتُقصَر خبرة الولايات المتحدة في مجال إعادة معالجة الوقود المستنفد على العمر التشغيلي القصير لمحطة ويست فالي بولاية نيويورك بين عامي 1966 و1972. وقد اكتمل زج النفايات العالية الإشعاع من ويست فالي وتعبئتها في صناديق عام 2002 (مازالت النفايات العالية الإشعاع في الموقع). والموقع ملوث بيئياً، من المتوقع أن تستغرق عملية تنظيفه 40 سنة (West Valley Environmental Services and URS Corporation Washington Divison, 2009; Union of Concerned Scientists, 2008). وبالإضافة إلى ذلك، كان أحد الأسباب الكثيرة؛ لإغلاق المصنع هو صعوبة الوفاء بالمتطلبات التنظيمية المتعلقة بمستويات الإشعاع الذي يتعرض له العمال (Gillette, 1974).

تشير تجربة عمليات المعالجة الأكثر تقدماً في فرنسا والمملكة المتحدة إلى أن السلامة يمكن أن تتحسن بشكل كبير مع مرور الوقت؛ حيث كانت سجلات سلامة البيئة والعمال في لاهاي في فرنسا وسيلافيلد في المملكة المتحدة ضعيفة في البداية، ولكنها تحسنت بدرجة كبيرة مع

تحسن التكنولوجيا وتشديد اللوائح التنظيمية؛ ففي لاهاي مثلاً، انخفضت حالات تعرض البيئة والبشر للإشعاع بشكل كبير مع مرور الوقت برغم زيادة كمية النفايات المعالجة أضعافاً مضاعفة (IAEA, 2005; M. Schneider and Marignac, 2008).

وتعكف الولايات المتحدة ودول عدة أخرى، على دراسة طرائق جديدة لمعالجة الوقود المستنفد؛ بوصف ذلك جزءاً من أبحاث دورة الوقود المتقدمة،، بما فيها المعالجة المائية المتقدمة والمعالجة الحرارية (DOE, 2006, 2010c; IAEA, 2005; NEA, 2006). وتتطلب المعالجة الحرارية أساليب ومعدات وكواشف كيميائية مختلفة تماماً، ويفترض أن تكون آثارها في السلامة مختلفة تماماً عن آثار المعالجة المائية.

وإلى جانب أساليب المعالجة الجديدة، تتطلب دورات الوقود المغلقة تصميمات جديدة للمفاعل السريع، إلا أن الخبرة العالمية في المفاعلات السريعة لتوليد الكهرباء محدودة للغاية؛ حيث لا يوجد سوى عدد قليل من النماذج الأولية للمفاعلات أو المفاعلات التجريبية. ومع إغلاق مفاعل فينيكس في فرنسا عام 2009، لم يبقَ سوى مفاعل سريع واحد مازال يعمل، وهو مفاعل بيلويارسكي 3 في روسيا (IAEA, 2009a). لذلك من الصعب الحديث عن سجل سلامة حقيقي. كما أغلق مفاعل مونجو السريع في اليابان الذي كان يستخدم نظام التبريد بالصوديوم السائل عام 1995 قبل وصوله إلى العمل بكامل طاقته بسبب حادث تسرب للصوديوم (Pollack, 1996). ولم يسفر ذلك الحادث عن إصابة أحد بأذى، وكان أثره البيئي ضئيلاً، إلا أن السلطات اليابانية حاولت إخفاءه؛ ما أدى إلى كارثة علاقات عامة قضت على تأييد الرأي العام للمشروع النووي في اليابان (Normile, 2009).

الأمن: مكمن القلق الرئيسي عند النظر في دورات الوقود النووي المتقدمة هو خطر انتشار السلاح النووي. فجميع طرائق المعالجة الحالية تنطوي على عزل البلوتونيوم وتخزينه طوال أشهر عدة على الأقل، قبل أن يمكن استخدامه لصنع الوقود المعاد تدويره. وهذا يجعل الدورة المفتوحة، التي لا يُعزل فيها البلوتونيوم عن الوقود المستنفد العالي الإشعاع، أكثر أمناً. لهذا اعتمدت الولايات المتحدة، كما ذكرنا سابقاً، منذ عام 1977

سياسة تقوم على عدم إعادة معالجة الوقود المستنفد. وهي، إلى جانب كثير من البلدان الأخرى، تجري أبحاثاً لتحسين المراقبة والإجراءات الاحتياطية وأساليب المعالجة التي تقلل من كمية المواد الانشطارية وإمكانية الوصول إليها (DOE, 2006; 2010c). فمثلاً، يعمل الإطار الدولي للتعاون في مجال الطاقة النووية،[14] وهو الذي تضطلع الولايات المتحدة بدور مهم فيه، على استكشاف مفهوم جديد لخدمات الوقود النووي بهدف تعزيز الموثوقية وأمن إمدادات الوقود وخدماته، بما في ذلك: إعادة معالجة الوقود المستنفد وتصنيع الوقود المعاد تدويره، من خلال حصر تقديم هذه الخدمات في السوق العالمية بعدد محدود من الدول الموثوق بها (IFNEC, 2010; GAO, 2008).

العقبات التقنية: هناك تحديات تقنية ملحة تواجه تطوير دورة الوقود المغلقة. فبسبب القيود على العزل الكيميائي وفصل النظائر في أثناء عملية إعادة المعالجة، يؤدي التدوير المتكرر للوقود إلى تراكم مختلف نظائر الأكتينيدات ونواتج الانشطار ونواتج التنشيط وغيرها من الملوثات في وقود المفاعلات، وهذا قد يؤدي إلى تدهور نوعية التفاعل النووي. هذا هو السبب الرئيسي وراء ندرة عمليات إعادة معالجة وتدوير وقود موكس واقتصار التكنولوجيا التجارية الحالية على عمليات إعادة التدوير لمرة واحدة. وهناك تحديات كبيرة تعوق تطوير نظام شامل تتناسب فيه مدخلات ومخرجات في عملية إعادة معالجة الوقود المستنفد وحرق المفاعلات السريعة، مع التقليل في الوقت ذاته من إنتاج النفايات واستخدام الموارد الطبيعية والتكاليف وخطر انتشار السلاح النووي (NEA, 2006; IAEA, 2005). وتُجرى منذ سنوات طويلة أبحاث لتحسين هذه العوامل تقوم بها بلدان ومؤسسات دولية، ولكن معظم التقديرات يشير إلى أننا مازلنا نحتاج إلى عقود طويلة للوصول إلى حل عملي (GAO, 1993; DOE, 2010c; Holt, 2008; NEA, 2009a; Jackson, 2003; IAEA, 2005).

قبول الرأي العام: يتضمن تنفيذ دورة وقود مغلقة إنشاء أنواع جديدة من البنية التحتية للطاقة النووية. وهذا يتطلب على الأقل محطة كبيرة لإعادة معالجة الوقود المستنفد ومرافق جديدة لتخصيب اليورانيوم وتصنيع الوقود وأسطولاً جديداً من المفاعلات السريعة. ونظراً إلى التوسع الكبير في البنية التحتية المطلوبة، فإن مشكلات قبول الرأي

العام قد تفوق مشكلات الاستمرار في التخزين السطحي أو التخلص الجيولوجي الدائم. ومن المرجح أن تتضخم هذه المخاوف بسبب كون التجربة المحدودة للولايات المتحدة مع إعادة المعالجة اتسمت بضعف الأداء وخلفت إرثاً من التلوث البيئي. كما أن توليد الطاقة من المفاعلات السريعة في جميع أنحاء العالم فشل تجارياً وواجهته الكثير من المشكلات التقنية، وهذا كله يسهم في تكوين الانطباع العام عن خيار دورة الوقود المتقدمة.

وكذلك، قد تساعد فوائد دورات الوقود المغلقة في مجال إدارة النفايات على المدى الطويل في توفير بعض التأييد لخيار دورة الوقود المغلقة. وبما أن التخلص من النفايات عامل مهم في المأزق الحالي للسياسة النووية، فقد تساعد حقيقة أن دورة الوقود المغلقة ربما تقلل من كمية النفايات العالية الإشعاع في تسهيل قبول الرأي العام. ولكن هذا الافتراض يبقى بحاجة إلى إثبات.

التكلفة: بالمقارنة إلى دورة الوقود المفتوحة الحالية، فإن الانتقال إلى دورة الوقود المغلقة يؤثر في التكلفة بطرائق عدة. وهناك تحليلات عدة للتكاليف أجراها كل من: بون وفيتر وآخرين (Bunn, Fetter, et al, 2003) وشنايدر ودينيرت وكادي (E. Schneider, Deinert, and Cady, 2009) ووكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (NEA, 2006) وجروبرت وباتينيو- إيتشيفيري (Grubert and Patiño-Echeverri, 2009) حددت عوامل عدة مهمة، تدخل في حساب التكلفة؛ من بينها: البناء والتشغيل للمفاعلات السريعة، والاستثمارات الرأسمالية في جيل جديد من محطات إعادة المعالجة والتخصيب وتصنيع الوقود، ونقل الوقود إلى محطة إعادة المعالجة ومعالجته، والتخلص من النفايات العالية الإشعاع والمتوسطة الإشعاع والمنخفضة الإشعاع الناتجة من إعادة المعالجة. كما أن البلوتونيوم واليورانيوم المسترجعين من الوقود المستنفد والمعاد تدويرهما إلى وقود جديد يخفضان تكلفة إنتاج الوقود. وتجدر الإشارة إلى أن تكاليف التطوير والتجريب لمحطات إعادة المعالجة والمفاعلات السريعة اللازمة للدورة المتقدمة ستشكل إضافة كبيرة إلى التكلفة الإجمالية. ولكن لم يحاول أي من التحليلات تقدير هذه التكاليف.

تكمن إحدى صعوبات تقدير تكاليف دورات الوقود المتقدمة في أن معظم أشكال هذه الدورات بعيد كل البعد عن مرحلة الاستخدام التجاري. كما أن هناك مجموعة واسعة من

دورات الوقود المتقدمة المحتملة، وقد تكون لكل منها تكاليف مختلفة تماماً. وهذا يعني أنه لا توجد أساساً أي بيانات تجريبية، ما يجعل التكاليف غير مؤكدة إلى حد كبير. وحتى إعادة المعالجة التقليدية التي دخلت طور الاستخدام التجاري منذ عقود مازالت محصورة بعدد قليل من الشركات الحكومية التي لا ترغب في الكشف علناً عن التكاليف والأسعار. وبالاعتماد على أفضل البيانات المتاحة، قدّر بون وفيتر وآخرون (Bunn, Fetter, et al, 2003) أن قيمة بعض عناصر التكلفة الضرورية في دورة الوقود المتقدمة في المفاعل السريع منافسة لدورة الوقود المفتوحة (باستخدام تحليل التعادل). والنتائج التي تم الوصل إليها تبين أن تكاليف اليورانيوم الخام وتخصيب اليورانيوم وبناء مفاعل سريع وتشغيله والتخزين المؤقت للوقود المستنفد وإعادة معالجة الوقود المستنفد أو التخلص من النفايات يجب أن تنخفض بنسبة كبيرة قبل أن تصبح دورة الوقود المتقدمة منافسة، من حيث التكلفة لدورة الوقود المفتوحة الحالية.[15] وخلص التحليل إلى نتيجة مفادها أن دورة الوقود المتقدمة ليست منافسة، من حيث التكلفة لدورة الوقود المفتوحة الحالية؛ حيث قالوا: إن «هناك فارقاً كبيراً بين تكلفة إعادة المعالجة والتدوير وبين التخلص المباشر، ومن المرجح أن يستمر هذا الوضع عقوداً طويلة في المستقبل» (Bunn, Fetter, et al, 2003, p.9).

كما خلص تحليل باتينيو-إيتشيفيري (Grubert and Patiňo-Echeverri, 2009) إلى نتائج مشابهة جداً.

التخلص الجيولوجي الدائم

كل واحد من الخيارات التقنية الثلاثة السابقة، يجب أن يتبعه في نهاية المطاف التخلص الجيولوجي الدائم. ويقصد بالتخلص الجيولوجي الدائم وضع الوقود النووي المستنفد والنفايات العالية الإشعاع في أنفاق أو حجرات أو ممرات رأسية على بعد مئات عدة من الأمتار تحت الأرض، مع عدم وجود نية لاسترجاعه في المستقبل (IAEA, 2003). هذا الإجراء يهدف إلى عزل النفايات النووية عن المحيط الحيوي لئلا تعود ضارة بصحة الإنسان أو البيئة. وهذا أمر صعب لأن العمر النصفي للنويدات المشعة في الوقود النووي المستنفد طويل جداً. والطريقة المرجحة لوصول النويدات المشعة إلى

المحيط الحيوي في نهاية المطاف هو تسرب المياه الجوفية إلى المستودع، وتآكل حاويات النفايات، وانتقال المياه الجوفية الملوثة إلى شبكات مياه الشرب أو الري الزراعي (IAEA, 2003; NEA, 2006; MIT, 2003). يقوم نظام التخلص الجيولوجي الدائم على مفهوم حماية متعددة الطبقات تتكون من الاحتواء المادي، والإطلاق البطيء، وإعاقة التدفق من خلال عمليات جيوكيميائية، والتشتيت والتخفيف في البيئة المحيطة (IAEA, 2001; NEA, 2006). ويتحقق ذلك من خلال الجمع بين الحواجز الصناعية (مثل الحاويات ونظم منع التكاثف والمواد العازلة) والطبيعية (الجيولوجية والهيدرولوجية). وعندما تصل النفايات إلى المحيط الحيوي، تكون قد تلاشت وتشتتت بما يكفي لجعلها غير خطيرة (NEA, 2006; IAEA, 2001, 2003).

من المتوقع أن تبقى حاويات النفايات سليمة بما يكفي لعزل النفايات عن المياه الجوفية لمدة لا تقل عن آلاف عدة من السنين (DOE, 2002; IAEA, 2003; NEA, 2006). وبرغم انخفاض النشاط الإشعاعي بشكل كبير خلال هذا الوقت، فإن خطر الإشعاع يبقى قائماً لمئات الآلاف من السنين؛ أي بعد أن تنهار معظم الحواجز الصناعية (MIT, 2003; NEA, 2006). لذلك فإن الجانب الأهم في أداء نظام المستودع الجيولوجي الدائم هو خصائص التشكيلات الجيولوجية التي توضع فيها النفايات. والبيئة المفضلة للتخلص الجيولوجي الدائم هي البيئة التي تتصف باستقرار جيولوجي طويل الأجل، وانخفاض محتواها من المياه الجوفية وتدفقها، وظروف جيوكيميائية مستقرة، وخصائص هندسية مناسبة (IAEA, 2003).

إن مفهوم التخلص الجيولوجي الدائم يتضمن - بشكل تفصيلي - مجموعة واسعة من العناصر المختلفة، بما في ذلك أنواع الصخور المختلفة (مثل الصخور البركانية والجرانيت والحجر والطين والملح) والتصميمات المختلفة للمستودع وأساليب وضع النفايات والأشكال المختلفة لحاويات النفايات وتصميمات الحواجز الهندسية (National Research Council, 2001; IAEA, 2001). وقد يكون لكل من هذه العناصر تأثيرات مهمة في التقويم، وفقاً لمعاييرنا. ولكن نظراً إلى المجموعة الواسعة من خيارات إدارة الوقود المستنفد التي نستعرضها في هذه الدراسة والطبيعة النوعية لتقويمنا، سندرس نموذجاً عاماً للتخلص الجيولوجي الدائم. وهناك بعض الجوانب، ولاسيما التكاليف، تقوم تحديداً على مشروع جبل يوكا.

تقويم التخلص الجيولوجي الدائم

في تقويم الآثار المترتبة على خيار التخلص الجيولوجي الدائم، مثل المستودع المقترح في جبل يوكا، سننظر فقط إلى الآثار على المدى القريب؛ أي خلال العقود القادمة التي يمكن خلالها تنفيذ البدائل المختلفة التي ندرسها، وذلك لكي يمكن مقارنة آثار البدائل المختلفة خلال فترات زمنية متساوية تقريباً. ولكل واحد من البدائل أثر في المدى الطويل، بما يتجاوز 50 سنة أو نحو ذلك. إلا أننا سنتطرق إلى الفروق في هذه الآثار على المدى الطويل عندما نقارن الآثار الاجتماعية للبدائل المختلفة في الأجيال الحالية والأجيال القادمة.

السلامة: أكبر مخاطر التخلص الجيولوجي الدائم على السلامة على المدى القصير تماثل المخاطر المرتبطة بالتخزين المركزي المؤقت أو التخزين في الموقع؛ أي مناولة النفايات وتعبئتها ونقلها. وبشكل عام تعد هذه المخاطر صغيرة، كما ناقشنا ذلك سابقاً. ومن بين المخاوف الأخرى بشأن التخلص الجيولوجي الدائم مخاطر التلوث البيئي (مثل تسرب النفايات من شرخ في الحاويات) وسلامة العمال في أثناء وضع حاويات النفايات. ولكن جميع هذه النشاطات لا تمثل تحدياً هندسياً، ومن المتوقع أن تكون مخاطر السلامة ضئيلة.

الأمن: يوفر التخلص الجيولوجي المباشر من الوقود النووي المستنفد أعلى درجات الأمن ضد خطر انتشار السلاح النووي بين جميع الخيارات التي ندرسها. ويزيد هذا الأسلوب على الظروف الآمنة للتخزين المركزي المؤقت أو التخزين في الموقع في أنه يعزل حاويات الوقود المستنفد على عمق مئات الأمتار تحت سطح الأرض في أنفاق مردومة. وإذا كانت النفايات النووية مخزنة في أعماق الأرض فسيكون العبث بها أو سرقتها أصعب بكثير.

العقبات التقنية: لا يتوقع وجود عقبات تقنية كبيرة في وجه حفر مستودع جيولوجي دائم وتعبئته وإغلاقه. وقد أشارت الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA, 2003) إلى وجود خبرة كبيرة في جميع أنحاء العالم في أعمال حفر وبناء لتجاويف ذات دعم ذاتي في أنواع الصخور المختلفة على عمق مئات الأمتار تحت الأرض. وخلصت تلك الدراسة إلى أن «التخلص الجيولوجي العميق ممكن تقنياً ولا يمثل أي مشكلات جديدة بالنسبة إلى هندسة الصخور» (ص 69). علاوة على ذلك، وصلت كل من السويد وفنلندا إلى مراحل

متقدمة في تصميم وترخيص لمستودعات جيولوجية للوقود المستنفد؛ ما يشير إلى أن هذا الأسلوب مُجدٍ وقابل للتطبيق.

قبول الرأي العام: توضح الجهود المبذولة لإلغاء مشروع جبل يوكا تحديات قبول الرأي العام على المستوى المحلي ومستوى الولاية. فقد اتخذت وكالات مختلفة، مدفوعة بعدم وجود دعم شعبي، خطوات لتأخير المشروع أو إلغائه عن طريق عدم منح التصاريح اللازمة لتطوير الموقع؛ فمثلاً رفضت ولاية نيفادا منح وزارة الطاقة حقوق استخدام المياه الضرورية لبناء خط سكة حديدية ومباني المنشأة في جبل يوكا (GAO, 2009). وعلى حين توجد أسباب كثيرة لغياب الدعم الحكومي الرسمي لمشروع جبل يوكا، فقد لوحظ أنه برغم عدم وجود دور يذكر لحكومات الولايات والحكومات المحلية في اتخاذ القرارات الرسمية المتعلقة بجبل يوكا، فقد نجحت المعارضة الشرسة داخل الولاية في عرقلة تطوير الموقع حتى الآن.

أكدت الوكالة الدولية للطاقة النووية أهمية قبول الرأي العام في تطوير المستودع (IAEA, 2007b)؛ حيث قالت: إن البعد التقني مهم في الحل المقبول، ولكن "أي حل مقبول" يجب أن يجمع ما بين البعدين التقني والاجتماعي. وعند النظر في مشكلات قبول الرأي العام، قد يكون من المفيد أن نقارن بين وضع مشروع جبل يوكا وإنشاء المحطة التجريبية لعزل النفايات في نيو مكسيكو. افتتحت المحطة التجريبية لعزل النفايات في عام 1999، وهي المستودع الجيولوجي الدائم الوحيد في العالم للنفايات المشعة المعمرة (National Research Council, 2001). وبعكس جبل يوكا، لا تستقبل هذه المحطة إلا نفايات ما بعد اليورانيوم (ملابس واقية، أدوات، معدات، تربة، وغيرها من المواد الملوثة بعناصر ما بعد اليورانيوم)، وهي تعمر طويلاً مثل الوقود النووي المستنفد، ولكن مستويات إشعاعها أقل بكثير من مستويات إشعاع الوقود النووي المستنفد. هذا الاختلاف يجب أن نبقيه في أذهاننا عند النظر في اختلاف النتائج بالنسبة إلى قبول الرأي العام في الحالتين. ومع ذلك قد تكون هناك دروس مفيدة من نجاح المحطة التجريبية لعزل النفايات. فكما لاحظ المجلس الوطني للبحوث (National Research Council, 2001)، أحد أسباب حصول المحطة التجريبية لعزل النفايات على دعم الرأي العام على

المستوى المحلي ومستوى الولاية هو ارتباطها القوي بالنشاطات الدفاعية؛ حيث لا تقبل المحطة إلا النفايات الناتجة من تلك النشاطات، وهناك تاريخ طويل من إشراك نيو مكسيكو في نشاطات الدفاع الوطني؛ فمختبرات سانديا الوطنية ومختبر لوس ألاموس الوطني، هما من الجهات الكبرى التي توفر الوظائف لسكان نيو مكسيكو. وبالقياس، من المعتقد أن دعم الرأي العام لبناء مستودع جيولوجي دائم يستقبل الوقود النووي المستنفد من المحطات النووية التجارية سيكون أكبر في المناطق التي ترتبط اقتصاداتها المحلية بإنتاج الطاقة النووية ويشعر قاطنوها بالولاء لها.

التكلفة: وضع مكتب المحاسبة الحكومي (GAO, 2009) تقديراً لتكاليف مستودع جبل يوكا. ومعظم هذه التكاليف هي تكاليف رأسمالية أولية، ويعتمد مجموعها على حجم المستودع. وكما أشرنا في المقدمة فإن قانون سياسة النفايات النووية، بصيغته المعدلة، حدد كمية النفايات التي يمكن تخزينها في جبل يوكا بـ 70,000 طن معدن ثقيل. ولكن وزارة الطاقة (DOE, 2008d) تقول إن هذا الحد لا يقوم على أي اعتبارات تقنية تتعلق بجبل يوكا، وإنه إذا وضعنا الحدود القانونية جانباً فإن الدراسات تشير إلى أن جبل يوكا يمكن أن يتسع لثلاثة أضعاف هذه الكمية أو أكثر. بناء على ذلك وضع مكتب المحاسبة الحكومي (GAO, 2009) تقديرين للتكلفة. التقدير الأول لكمية 153,000 طن معدن ثقيل، ويمكن مقارنته مباشرة مع تكاليف التخزين في الموقع والتخزين المركزي المؤقت. في هذه الحالة، قدر مكتب المحاسبة الحكومي أن تكلفة بناء المستودع في جبل يوكا وتشغيله حتى عام 2151 سيكلف ما بين 41 ملياراً و67 ملياراً من الدولارات (بحسب قيمة الدولار عام 2009). أما التقدير الثاني فهو لحالة الإبقاء على الحد الأقصى المسموح قانوناً لسعة مستودع جبل يوكا والبالغ 70,000 طن معدن ثقيل. في هذه الحالة، ستتراوح تكلفة المستودع ما بين 27 ملياراً و39 ملياراً من الدولارات، ولكن ستكون هناك حاجة إلى سعة تخزين إضافية (DOE, 2008d).

نص قانون سياسة النفايات النووية على آلية تمويل لإنشاء مستودع جيولوجي دائم. وفي كانون الثاني/ يناير 2010، كان في صندوق النفايات النووية مبلغ 24 مليار دولار (Holt, 2010). وقد جُمِع هذا المبلغ عن طريق فرض رسم على شركات توليد

الكهرباء مقداره 0.001 دولار على الكيلو واط في الساعة من الكهرباء المولدة باستخدام الطاقة النووية وحساب فائدة على الرصيد الموجود في الصندوق. وفي عام 2008 أشارت التقديرات إلى أن 80٪ من الأموال اللازمة لتمويل المستودع ستأتي من صندوق النفايات النووية. أما نسبة 20٪ المتبقية فستأتي من الأموال المخصصة لتغطية تكاليف إدارة وزارة الطاقة للوقود النووي المستنفد والنفايات العالية الإشعاع، وسيتحملها دافعو الضرائب الفيدرالية (GAO, 2009).

المقارنة بين الأساليب التقنية

في هذا القسم نقارن بين الأساليب التقنية الأربعة، من حيث المعايير الخمسة التي سبق تحديدها. ونلخص الآثار النسبية للأساليب التقنية المختلفة في الجدول (2-3). والتقويمات نوعية بالضرورة وتتضمن الكثير من الأمور غير المؤكدة؛ بسبب عوامل كثيرة، وخاصة فيما يتعلق بدورة الوقود المتقدمة؛ حيث لا يوجد أساس لتقويم المعايير بناء عليه. والهدف من هذه المقارنة هو التعرف إلى الفروق الرئيسية بين التكنولوجيات بالنسبة إلى كل معيار.[16] وسنبين في هذا القسم، الأساس الذي قام عليه التقويم الوارد في الجدول (2-3).

الجدول (2-3)

تقويم الأساليب التقنية لإدارة الوقود النووي المستنفد

المعيار	استمرار التخزين في الموقع	التخزين المركزي المؤقت	دورة الوقود المتقدمة	التخلص الجيولوجي الدائم
المخاطر على السلامة	منخفضة	منخفضة	غير مؤكدة	منخفضة
المخاطر الأمنية	منخفضة	منخفضة	غير مؤكدة، يحتمل أن تكون منخفضة	منخفضة
العقبات التقنية	منخفضة	منخفضة	مرتفعة	متوسطة
تحديات قبول الرأي العام	متوسطة بشكل عام، ولكنها أعلى في المواقع التي جرى تفكيكها	قليلة قرب محطات الطاقة النووية، ولكن من المرجح أن تكون أكبر قرب مواقع التخزين المؤقت	كبيرة على مستوى الموقع المحدد ويرجح أن تكون كبيرة ما لم يتم حل موضوع التخلص الجيولوجي الدائم	كبيرة على مستوى الموقع المحدد، ولكن أقل بكثير على المستوى الوطني
التكلفة	منخفضة	منخفضة	مرتفعة	متوسطة

السلامة: من ناحية السلامة، لا يوجد فرق كبير بين التخزين في الموقع والتخزين المركزي المؤقت. قد يتطلب استمرار التخزين في الموقع إعادة تعبئة الوقود المستنفد، وهذا قد يزيد من خطر تعرض العمال للإشعاع. وبينما قد يحقق التخزين المركزي المؤقت بعض الفوائد على صعيد السلامة من خلال تجميع النفايات، فمن المرجح أن تكون هذه الفوائد صغيرة. وبما أن تكنولوجيا التخزين متطابقة أساساً في الحالتين، فإن الاختلاف الأساسي على مستوى السلامة يرتبط بنقل الوقود المستنفد إلى موقع التخزين المركزي المؤقت. ولكن نقل الوقود النووي المستنفد يعد آمناً تماماً، كما ذكرنا سابقاً، وهو – من ثم – ليس عامل سلامة مهماً في عملية صنع القرار.

نحن نرى التخلص الجيولوجي الدائم مماثلاً للتخزين في الموقع والتخزين المركزي المؤقت من ناحية السلامة. وبينما ينطوي وضع حاويات النفايات في المستودع وردمها وإغلاق المستودع على حركة أكبر للنفايات وفرصة أكبر لتضرر الحاويات وتسرب الإشعاع منها، فإن عزل النفايات بعد ذلك عن التماس مع البشر يوفر مستوى سلامة أكبر من وجودها على سطح الأرض، وخاصة على المدى الطويل؛ حيث تزداد بشكل كبير الشكوك في موثوقية الرقابة المؤسسية وصيانة مرافق التخزين السطحي.

أما سلامة دورات الوقود المتقدمة التي تتضمن معالجة معقدة للوقود فهي أقل وضوحاً. وبشكل عام فإن تحويل الوقود النووي المستنفد من مادة صلبة خاملة في حاوية معدنية إلى خليط غير متجانس من الأشكال الكيميائية الأكثر قدرة على التأثير في الصحة والبيئة قد يزيد من المخاطر التي تهدد سلامة البيئة والعمال. وتجارب المعالجة التقليدية تظهر أن السلامة مصدر كبير للقلق وأن المحافظة على الظروف الآمنة تتطلب إدارة حريصة. ومن المتوقع أن تقترن الأساليب التجريبية الجديدة لمعالجة الوقود النووي بمجموعة من المخاوف الجديدة بشأن السلامة؛ ولذلك فإن خيار دورة الوقود المتقدمة يقل، من حيث مستوى السلامة، عن التخزين في الموقع أو التخزين المركزي المؤقت أو التخلص الجيولوجي الدائم.

الأمن: تُمثل المخاوف الأمنية الأساسية المتعلقة بإدارة الوقود النووي المستنفد في سرقة المواد الانشطارية لاستخدامها في صنع سلاح نووي وسرقة النفايات المشعة لاستخدامها في صنع جهاز تشتيت الإشعاع ("القنبلة القذرة"). وقد ناقشت الكثير من الدراسات مخاطر انتشار السلاح النووي، وتحليل هذه المخاطر بشكل تفصيلي يقع خارج نطاق تحليلنا. النقطة الرئيسية التي وردت في تلك التحليلات ولها صلة بدراستنا هي عدم قدرة اللصوص المحتملين على الوصول إلى المواد الانشطارية (البلوتونيوم في المقام الأول) في الوقود النووي المستنفد لأنها موزعة داخل مصفوفة صلبة من أكسيد اليورانيوم ونواتج الانشطار شديدة الإشعاع. ووجود المواد الانشطارية ممزوجة فيزيائياً وكيميائياً مع مواد أخرى ومحمية من العبث بفعل النشاط الإشعاعي العالي لتلك المواد يشكل رادعاً قوياً ضد سرقتها واستخدامها لاحقاً لأغراض حاقدة. لذلك فإن أساليب التخزين في الموقع والتخزين المركزي المؤقت والتخلص الجيولوجي الدائم، التي يبقى فيها البلوتونيوم جزءاً من حزمة الوقود المستنفد، هي بطبيعتها أفضل لمنع انتشار السلاح النووي من دورة الوقود المتقدمة التي يعزل فيها البلوتونيوم عن مكونات الوقود المستنفد الأخرى. ومن بين هذه الأساليب يتميز التخلص الجيولوجي الدائم بميزة أمنية إضافية هي عزل النفايات عن التماس مع البشر. فحتى لو وُجِدت جهة تريد عزل البلوتونيوم من الوقود النووي المستنفد ولديها القدرة على ذلك، فسيكون عليها بذل جهود كبيرة تستغرق وقتاً طويلاً للحفر واستخراج الوقود المستنفد من المستودع، ويمكن الكشف عنها بسهولة.

يُعد التقليل من مخاطر انتشار السلاح النووي مبدأً أساسياً تقوم عليه جميع المبادرات الأمريكية والدولية لاستكشاف دورات الوقود المتقدمة. وأحد الأهداف الأساسية لتلك المبادرات هو عدم عزل البلوتونيوم خلال إعادة معالجة الوقود المستنفد وتدويره. وماتزال الأساليب التقنية قيد التطوير، ومازال من غير الواضح مدى إسهامها في الحد من انتشار السلاح النووي. ومن الضمانات الإضافية التي توفرها بعض المبادرات الدولية إمكانية حصر إعادة معالجة الوقود المستنفد وتصنيع الوقود المعاد تدويره، من حيث المبدأ، في مجموعة مختارة من البلدان تقدم خدمات الوقود إلى دول العالم الأخرى. ومهما كانت مخاطر انتشار السلاح النووي المترتبة على أسلوب إعادة المعالجة المعتمد بهذه الطريقة، في نهاية المطاف، فإنها ستبقى محصورة ضمن مجموعة محددة من المشغلين الموثوق بهم.

العقبات التقنية: يجري تخزين الوقود النووي المستنفد في مواقع المفاعلات منذ بداية الاستخدام التجاري للطاقة النووية في توليد الكهرباء. وقد ترسخت المواد والأساليب المستخدمة في التخزين في البراميل الجافة، كما بات نقل الوقود المستنفد من أحواض التخزين إلى البراميل ممارسة قائمة. ومن حيث الأساس فإن تكنولوجيا التخزين المركزي المؤقت تشبه تكنولوجيا التخزين في الموقع. ومن المتوقع أن توجد عقبات تقنية قليلة في وجه نقل كامل الوقود النووي المستنفد إلى براميل التخزين الجاف للاستمرار في التخزين في الموقع أو التخزين المركزي المؤقت. وحتى لو تبين وجود عيوب أو مشكلات أخرى في البراميل، فلن تنطوي إعادة تغليف قضبان الوقود المستنفد في براميل جديدة على أي تحديات تقنية خاصة.

وبالمثل، لا توجد عقبات تقنية صعبة في وجه حفر مستودع جيولوجي دائم وملئه بالنفايات النووية، مع أنه يحتاج إلى جهود هندسية أكبر من تلك اللازمة في التخزين السطحي. والفرق الرئيسي يكمن في الالتزام المالي والمدة الزمنية اللازمة.

العقبات التقنية في وجه دورات الوقود المتقدمة أكبر. وبما أن دورات الوقود الأكثر تقدماً ماتزال في مراحل البحث والتطوير، فهناك - حكماً - الكثير من التحديات التقنية التي لما تحل بعد.

قبول الرأي العام: برغم أن الناس في بعض المناطق ليسوا مرتاحين تماماً لفكرة استمرار تخزين الوقود النووي المستنفد في مواقع المحطات النووية، فإن نقل الوقود المستنفد إلى مواقع التخزين المركزي المؤقت، حتى لو كانت بعيدة عن المناطق المأهولة بالسكان، سيواجه على الأرجح تحديات متزايدة من خلال إثارة مسألة سلامة النقل وإعادة طرح موضوع مكان التخلص النهائي من الوقود المستنفد، والذي مازال من دون حل، أما تطوير دورات الوقود المتقدمة فيرجح أن يواجه صعوبات أكبر بكثير في نيل قبول الرأي العام بسبب الحاجة إلى تطوير البنية التحتية الرئيسية والشكوك المحيطة بسلامة البيئة والعمال والسجل الصحي لعمليات إعادة المعالجة. كما باتت الصعوبات الهائلة التي تواجه قبول الرأي العام بالتخلص الجيولوجي الدائم معروفة تماماً من تاريخ جبل يوكا، وإن كانت تجربة المحطة التجريبية لعزل النفايات تشير إلى أن هذه الصعوبات ليست عصية على الحل.

التكلفة: نلخص في الجدول (2-4) تقديرات التكلفة التي وضعها مكتب المحاسبة الحكومي (GAO, 2009) لأساليب التخزين في الموقع والتخزين المركزي المؤقت والتخلص الجيولوجي الدائم، التي سبقت مناقشتها. وقد وضع كل تقدير لكمية 153,000 طن معدن ثقيل من الوقود النووي المستنفد. في حالتي التخزين في الموقع والتخزين المركزي المؤقت، تشمل التقديرات رأس المال وتكاليف التشغيل لتخزين الوقود المستنفد لمدة 100 سنة؛ وحالَ التخلص الجيولوجي الدائم، تغطي التكاليف البناء والتشغيل حتى عام 2151، وهذا يشمل ملء المستودع وإغلاقه. وقد أظهرت النتائج أن تكاليف التخزين في الموقع والتخزين المركزي المؤقت قريبة من بعضها بعضاً، على حين أن تكلفة التخلص الجيولوجي الدائم أكبر بكثير. وإذا أخذنا متوسط التكاليف فسنجد أن تكلفة التخلص الجيولوجي الدائم تزيد بنحو 2.4 مرة على تكلفة التخزين السطحي خلال مدة 100 سنة. وطبعاً، فإن زيادة تكلفة التخلص الجيولوجي الدائم أمر متوقع، لأن التخزين السطحي يبقى بحاجة إلى خطوات إدارة لاحقة على المدى الطويل (ربما إعادة التغليف بعد 100 سنة، والتخلص الجيولوجي الدائم على المدى الطويل كما يفترض). ولا يتضمن الجدول (2-4) تقدير تكلفة دورة الوقود المتقدمة بسبب الشكوك الكبيرة في تقدير تكاليف دورات الوقود المتقدمة. وكما سبق القول فإن الدورات المتقدمة بعيدة كل البعد عن مرحلة الاستخدام التجاري، ولا يمكن معرفة نوع دورة الوقود المتقدمة التي ستطبق في نهاية المطاف، ما يجعل من الصعب جداً تقدير التكاليف المحتملة.

الجدول (2-4)

مقارنة بين تكاليف ثلاثة أساليب تقنية لإدارة الوقود النووي المستنفد

(بحسب قيمة الدولار عام 2008)

الأسلوب التقني	التكلفة (دولار/ كغ معدن ثقيل)
التخزين في الموقع	220-85
التخزين المركزي المؤقت	190-98
التخلص الجيولوجي الدائم	440-270

المصدر: مكتب المحاسبة الحكومي الأمريكي (GAO, 2009).

ملاحظة: جميع التقديرات هي لكمية 153,000 طن معدن ثقيل. وتكاليف التخزين هي لمدة 100 سنة. استخدم مكتب المحاسبة الحكومي مجموعة من عوامل الخصم في إطار محاكاة مونتي كارلو للوصول إلى تقديرات التكلفة بالقيمة الحالية المخصومة. يتضمن الملحق الرابع في تقرير مكتب المحاسبة الأمريكي (GAO, 2009) مناقشة مفصلة لافتراضات الخصم ومنهجيته.

لا بد من توضيح مهم حول استخدام التكلفة معياراً للمقارنة بين مختلف الأساليب التقنية لإدارة الوقود المستنفد، وهو أن إدارة النفايات لا تمثل سوى جزء صغير من التكلفة الإجمالية لتوليد الكهرباء في محطات الطاقة النووية. وهذا يختلف عن وضع المعايير الأخرى؛ حيث ترتبط المخاوف الأساسية للطاقة النووية ككل ارتباطاً وثيقاً بالأسئلة حول إدارة النفايات. وتسيطر تكاليف محطة الطاقة النووية (البناء والتشغيل والتجديد والتفكيك) على التكاليف الكلية لتوليد الكهرباء بالاعتماد على الطاقة النووية. وفي تحليل مفصل لآثار 13 دورة وقود مختلفة، وجدت وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (NEA, 2006) أن تكلفة إدارة النفايات لا تمثل إلا من 1٪ إلى 5٪ من تكلفة التوليد الإجمالية. ولذلك، وبرغم أن تكاليف الخيارات المختلفة لإدارة الوقود المستنفد قد تختلف اختلافاً كبيراً، فإن تأثير هذا الاختلاف في التكلفة الإجمالية يبقى ضئيلاً. ويختلف وضع دورات الوقود المتقدمة بعض الشيء في أن تنفيذ دورة الوقود المتقدمة يتطلب استثمارات كبيرة في البحث والتسويق وتطوير البنية التحتية تتجاوز بكثير إدارة النفايات. وهكذا فإنه على حين قد تكون تكاليف إدارة النفايات في دورة الوقود المتقدمة مقبولة، فهناك تكاليف كبيرة لازمة للوصول إلى النقطة التي يمكن فيها استخدام دورة الوقود المتقدمة.

الفصل الثالث

مراجعة الترتيبات المؤسسية والقانونية والتنظيمية

ندرس في هذا الفصل الفرضية القائلة بأن الترتيبات المؤسسية الحالية لعملية صنع القرار بشأن التخلص من الوقود النووي المستنفد هي السبب الرئيسي لعدم تمكن الحكومة الأمريكية من تنفيذ السياسة التي تنص على بناء مستودع دائم في جبل يوكا بحلول عام 1998. ونركز على الأدبيات الأكاديمية وغيرها من المصادر المنشورة للاطلاع على المناقشات الدائرة حول إمكانية حدوث تغيير في قبول الرأي العام وغيره من العوامل المتصلة بعملية صنع القرار لو جرى الخطاب السياسي واتُّخذت القرارات في إطار مؤسسي مختلف.

يبدأ هذا الفصل بلمحة موجزة عن الإطار المؤسسي الحالي المعني بوضع السياسة الخاصة بالتخلص من الوقود النووي المستنفد وتنفيذها، بالافتراضات الأساسية والأهداف والسياق القانوني وأدوار المؤسسات ومسؤولياتها والعمليات، بما في ذلك إشراك الجمهور. ثم نستعرض الأدبيات بحثاً عن نقد لهذا الإطار، ونقوّمه بناء على فئتين من المعايير: كفاءة المؤسسات وقدراتها (مثل: الحوافز وتعارض المصالح والخبرة)، وسمات عملية صنع القرار (مثل: حل النزاعات والشفافية والمصداقية والإنصاف والمساواة والالتزام بالمهل المحددة والكفاءة). وبعد إجراء هذا التقويم نناقش الآثار المترتبة على إعادة هيكلة الإطار المؤسسي الحالي المسؤول عن تنظيم الوقود النووي المستنفد وإدارته وتخزينه.

نظرة عامة إلى الإطار المؤسسي الحالي

في أواخر سبعينيات القرن الماضي، كانت الطاقة النووية، وهي التي تلقت دفعة من صدمات أسعار النفط في ذلك العقد، قد فقدت الكثير من بريقها.[1] فقد كانت مشروعات الطاقة النووية تكلف دائماً أكثر بكثير، وأكثر غالباً بأضعاف عدة، مما كان متوقعاً في البداية،

وكانت أغلى بكثير من بدائل الوقـود الأحفـوري (MIT, 2003, p. 38). كـما تراجـع قبـول الرأي العام، وخاصـة بعـد حـادث عـام 1979 في محطـة ثـري مايـل أيلانـد النوويـة قـرب هاريسبيرج بولاية بنسلفانيا. ومع بقاء تكاليف توليد الكهرباء مـن الفحـم والغـاز الطبيعـي والنفط أقل بكثير من تكلفة الكهرباء النووية طوال عقد الثمانينيات، كانت الصناعة النوويـة ترى أن إبقاء خيار الطاقة النووية مفتوحاً، عندما تتغير الظـروف الاقتـصادية وتـصبح أكثـر إيجابية، سيعتمد على إدراك الجـمهور بأن الولايات المتحـدة تـسير عـلى درب "حـل" مشـكلة النـفايات؛ أي أن التخـلص الـدائم مـن الـوقود النـووي المستنـفد هـو المـرحلة النـهائية (L. Carter, 1987; Stewart, 2008). وحتـى مـا بـين منتـصف السبعينيات وأواخرها، كانت شـركات المرافـق والحكومـة تفـترض أن إعـادة المعالجـة ستسمح بالتخلص من معظم الوقود المستنفد، ولن يبقى منه سوى كميات صغيرة نسبياً من النفايات التي يلزم دفنهـا مـع النفايـات العاليـة الإشـعاع والنفايـات مـن الـبرامج الدفاعية. إلا أنه تبين خطأ هذا الافتراض بعدما توضحت التكاليف الاقتصادية الكاملة ومتطلبات السلامة لإعادة المعالجة وبعدما قررت إدارة كـارتر والكـونغرس أن مخـاطر انتشار السلاح النووي عالية جداً (National Research Council, 2001). وأدى قرار إدارة كارتر بمنع إعادة المعالجة إلى جعل التخزين في الموقع والتخـزين المركـزي المؤقـت والتخلص الدائم هي الخيارات الوحيدة المتاحة.

هذا القرار أجبر الكونغرس على مواجهة السؤال المطروح عـما إذا كـان مـن المقبـول بالنسبة إلى الرأي العام ترك الوقود المستنفد والنفايات النووية الأخرى العالية الإشعاع في التخزين المؤقت في محطات الطاقة أو في مرافق مركزية؛ ما يعني فعلياً إلقاء عبـء تكـاليف ومخاطر التخلص الدائم على الأجيال القادمة. وقرر الكـونغرس أن الجـواب هـو لا، وأن على الولايـات المتحـدة التحـرك بـسـرعة نحـو مـستودع دائـم. ونتيجـة لـذلك، أصـدر الكونغرس قانون سياسة النفايات النووية لعام 1982 الذي وضع الإطار المؤسـسي الـذي مايزال قائماً اليوم. وفي التعديلات التي أجريت على قانون سياسة النفايات النووية في عـام 1987، مضـى الكونغرس خطوة أخرى ففرض المزيد من القيود عـلى التخـزين في الموقـع

والتخزين المركزي المؤقت، وفرض رقابة على التخزين المؤقت خشية أن يحول ذلك دون تحقيق الهدف الطويل الأجل الممثل بالدفن الدائم. هذه المخاوف أثرت في نهاية المطاف في جميع خيارات السياسة الرئيسية المتعلقة بأهداف البرنامج وجدوله الزمني وهياكله التنظيمية (Stewart, 2008).

كان لقانون سياسة النفايات النووية هدفان أساسيان:

- تحديد موقع لمستودعين دائمين وبناؤهما، واحد في الشرق وواحد في الغرب، على أن يبدأ الأول بتسلم النفايات في عام 1998.
- نقل المخاطر والمسؤولية المرتبطة بملكية النفايات العالية الإشعاع أو الوقود المستنفد من مالكي المحطات إلى الحكومة الفيدرالية والتخلص منها.

وقد رأى الكونغرس كل خطوة من هذه الخطوات مهمة؛ لزيادة قبول الرأي العام بالطاقة النووية وخفض الحواجز القانونية في وجه بناء محطات جديدة. فالتخزين في الموقع إجراء مؤقت إلى أن يصبح المستودع جاهزاً لاستقبال النفايات. وقد غيّر قانون سياسة النفايات النووية، بصيغته المعدلة، الهدف الأول من خلال تركيز جميع الموارد على موقع جبل يوكا واستبعاد المواقع المرشحة الأخرى.

نص قانون سياسة النفايات النووية، بصيغته المعدلة، وقانون سياسة الطاقة لعام 1992 (Pub. L. 102-486, §801) على أدوار المؤسسات ومسؤولياتها على النحو الآتي:

- تتولى وزارة الطاقة إجراء البحوث وتحديد خصائص المواقع واقتراح المناسب منها وإعداد طلبات ترخيص الموقع والتصميم والبناء للمستودعات وتسلم النفايات ونقلها إلى مواقع المستودعات وتشغيل المستودعات.
- تتولى هيئة تنظيم الطاقة النووية ترخيص المحطات الجديدة والتخزين في الموقع والمستودعات؛ وفقاً لمعايير السلامة الخاصة بها وتشرف على تفكيك المحطات ومرافق التخزين.

- تضع وكالة حماية البيئة معايير إطلاق النويدات المشعة للحد من تعرض الإنسان للإشعاع من عمليات المستودع على المدى الطويل. وفي البداية حددت وكالة حماية البيئة أن المقصود بالمدى الطويل هو 10,000 سنة، ولكنها غيرته في وقت لاحق إلى مليون سنة، بعد صدور قرار من المحكمة ينص على أن الوكالة لم تلتزم بتوصيات الأكاديمية الوطنية الأمريكية للعلوم.[2]

- تقدم الأكاديمية الوطنية للعلوم التوصيات التقنية بشأن معايير التخلص إلى وكالة حماية البيئة (أضيف هذا البند في قانون سياسة الطاقة لعام 1992).

- تقدم الشركات العاملة في الصناعة طلبات لبناء محطات نووية جديدة وتوسيع مرافق التخزين في الموقع بحسب الحاجة، من دون أن يكون لها - خلاف ذلك - أي دور في تحديد موقع المستودع أو ترخيصه. وتدفع شركات توليد الكهرباء من الطاقة النووية رسوماً تحتسب بناء على كمية الكهرباء (لا النفايات) المنتجة، مقابل التزام تعاقدي من وزارة الطاقة ببدء تسلم النفايات في عام 1998. وتودع تلك الرسوم، التي سمحت لجان المرافق العامة بتحميلها لدافعي فواتير الكهرباء، في صندوق النفايات النووية.

- لا تلعب الولايات التي أُنتجت فيها النفايات أي دور على الإطلاق في عمليات تحديد موقع المستودع وترخيصه، بينما يجوز للولاية التي يوجد فيها الموقع الذي هو قيد الدراسة (نيفادا بعد تعديل قانون سياسة النفايات النووية عام 1987 فقط)، إجراء أبحاثها الإضافية الخاصة فيما يتعلق بالموقع والمشاركة في عملية المراجعة التقنية التي تجريها وزارة الطاقة ولكن من دون أن يكون لها أي صلاحية لتغيير مسار الدراسة أو تصميم المستودع. ويجوز للولاية المضيفة ممارسة خيارها في معارضة النتيجة التي تخلص إليها وزارة الطاقة فيما يتعلق بملاءمة الموقع، ولكن سيكون عليها لكي تستطيع منع تطبيق تلك النتيجة إقناع أغلب أعضاء مجلسي الكونغرس بدعم معارضتها.

- تعمل السلطات المحلية بالتعاون مع الولاية على مراجعة البحوث والتقنية، ولا يكون لها بخلاف ذلك، أي صفة خاصة.

هناك الكثير من الميزات الجديرة بالملاحظة في هذا الترتيب. فأولاً، تلعب وزارة الطاقة أدواراً متعددة، فهي وكالة بحوث ومحامي المشروع ومدير المشروع وصاحب رخصة المشروع ومالك النفايات ومشغل المنشأة. ثانياً، في قانون سياسة الطاقة لعام 1992، حدد الكونغرس دوراً لجهتين تنظيميتين هما وكالة حماية البيئة وهيئة تنظيم الطاقة النووية، وأعطى الأكاديمية الوطنية للعلوم دوراً غير مسبوق هو تقديم توصيات لمواصفات معيار إطلاق النويدات المشعة. وأخيراً، حدد القانون مساراً من الخطوات المتتالية التي يجب أن تتبعها وزارة الطاقة، مع عدم إعطائها إلا القليل من الفرص لتعديل مسارها أو تغييره عند معرفتها المزيد عن الموقع أو تغيُّر نظرتها بشأن احتياجات التخزين أو استجابتها لمخاوف الرأي العام (National Research Council, 2003).

تقويم الإطار الحالي

هناك معيار بسيط يمكن استخدامه للحكم على نجاح الإطار المؤسسي الحالي، وهو ما إذا كان أدى إلى افتتاح مستودع دائم للنفايات بحلول عام 1998، وهو الهدف الأساسي لقانون سياسة النفايات النووية. واضحٌ أن النظام فشل في الوفاء بالموعد النهائي، برغم أن العملية قطعت جزءاً من المسار الذي حدده القانون للمستودع المقترح في جبل يوكا، ولاسيما بيان الأثر البيئي وتحديد الموقع المناسب في عام 2002 وتقديم طلب رخصة الموقع إلى هيئة تنظيم الطاقة النووية في عام 2008 (DOE, undated). ومازال القيادة السياسية في ولاية نيفادا تعارض المشروع معارضة شرسة (Nevada Office of the Attorney General, 2009; Reid, undated). وبما أن هذا المشروع هو الأول من نوعه، فمن الصعب القول إن كانت العملية مكلفة جداً حتى الآن في ظل عدم وجود مقارنة منصفة. ومع ذلك، بلغت التكلفة الفيدرالية لعملية تحديد موقع مناسب وتقديم طلب الترخيص حتى الآن 13.5 مليار دولار (بحسب قيمة الدولار في عام 2007)، وهو رقم أعلى بكثير من التكاليف التي كانت متوقعة في عام 1982 (DOE, 2008a).

والسؤال المحوري بشأن السياسة، هو: هل على الكونغرس الاستمرار في الوقوف إلى جانب هذه العملية وتركها تمضي قدماً أو لا؟ ثم: هل يتم ذلك بخطى بطيئة، أو أن

عليه إجراء تغييرات الآن في مواجهة الظروف الاقتصادية والبيئية التي تختلف كثيراً عن الظروف التي كانت سائدة في عام 1982؟ وفي ضوء موقف الإدارة الحالية التي سحبت طلبها المقدم إلى هيئة تنظيم الطاقة النووية للحصول على ترخيص لجبل يوكا، أصبح من غير الواضح إن كانت السياسة الحالية التي تركز على التخلص الدائم، والتي نص عليها قانون سياسة النفايات النووية وحافظ عليها الكونغرس خلال السنوات الخمس والعشرين الماضية، قد استُعيض عنها عملياً بسياسة تقوم على استمرار التخزين في الموقع. ويجادل كل من ستيوارت (Stewart, 2008) وأوينغ وسينغر وويلسون (Ewing, Singer, and Wilson, 2009) بأنه مادام الافتراض الأساسي الذي قامت عليه السياسة الوطنية الخاصة بالوقود المستنفد قد تغير، فلا بد من إجراء تغيير في الإطار المؤسسي وفقاً لذلك. وقد يتخذ هذا التغيير شكل تعديل القانون أو تنقيح السياسة واللوائح أو إعادة هيكلة المؤسسات أو إنشاء مؤسسات جديدة أو تغيير الترتيبات المالية أو تحقيق تقدم تكنولوجي. ويعتمد شكل التغيير بشكل كبير على الأهداف الوطنية والتقويم المنهجي لنقاط القوة والضعف في الترتيبات الحالية.

نقوّم في هذا القسم قدرة الإطار المؤسسي الحالي وأداءه بشكل يتجاوز موضوع النجاح أو الفشل في تحديد موقع المستودع، وذلك بهدف إنشاء معيار ننظر من خلاله إلى قيمة التغيير. ونقترح فئتين من المعايير التي يقوم عليها التقويم:

- كفاءة المؤسسات وقدراتها.
- أداء عمليات صنع القرار.

كفاءة المؤسسات وقدراتها

في فئة كفاءة المؤسسات وقدراتها، ننظر إلى أربعة معايير تبين ما إذا كان لدى المؤسسات الرئيسية ذات الصلة، وهي: وزارة الطاقة وهيئة تنظيم الطاقة النووية ووكالة حماية البيئة، الحد الأدنى من الكفاءة والقدرة اللازمتين للقيام بمهماتها؛ وهي:

- التناسب بين حوافز المؤسسة والهدف الوطني الممثّل بإدارة مخزون الوقود المستنفد في البلاد.

- القدرة على الاضطلاع بالمسؤوليات من دون نشوء حالات تعارض ومهمات الوكالة.

- الخبرة والقدرات التقنية.

- القيادة داخل المؤسسة.

سيكون لنتيجة تقويم هذه المؤسسات وفقاً لهذه المعايير أثر بالغ في جدوى بعض التغييرات المقترحة في الإطار المؤسسي. فإذا كان لديها فعلاً الكفاءة والقدرة لتقديم الأداء المتوقع منها، فسيكون من المنطقي أن نستنتج أن جهود تغيير الإطار المؤسسي يجب أن تركز على السياسة وعمليات صنع القرار المتعلقة بتنفيذ تلك السياسة. أما إذا تبين وجود جوانب قصور كبيرة في عمل هذه المؤسسات، فهذا يعني وجوب السعي لإحداث تغيير جذري في طريقة عملها. نناقش في هذا القسم الكفاءة والقدرة لدى كل مؤسسة بالاعتماد إلى حد كبير على مراجعتنا للأدبيات والمناقشات مع الخبراء التقنيين وصانعي القرار المطلعين على تاريخ السياسة المتعلقة بالوقود النووي المستنفد.

وزارة الطاقة: بعد الحديث مع عدد من الخبراء وإجراء تقويمنا الخاص تبين لنا أن عمل وزارة الطاقة يتأثر بوجود تعارض جوهري بين الجهود البحثية الهادفة إلى تحديد موقع للمستودع وبين المسؤولية القانونية عن الوفاء بالموعد المحدد لبدء تسلم النفايات، والذي حدده الكونغرس من دون النظر إلى إمكانية الالتزام به من الناحية التقنية. وفي ظل القانون الحالي، مايزال لدى وزارة الطاقة، بصفتها وكيلة عن الحكومة الفيدرالية، حافز كبير لتحديد موقع للمستودع الدائم في أسرع وقت ممكن من أجل تجنب الوضع الذي تجد نفسها فيه اليوم؛ حيث تدفع غرامات مالية كبيرة إلى شركات المرافق بسبب عدم قدرتها على تسلم الوقود المستنفد والمسؤولية عنه منذ عام 1998، وهو التاريخ الذي كان من المفترض أن يبدأ فيه المستودع بالعمل (Garvey, 2009).

برغم أن قانون سياسة النفايات النووية، عدّ المشروع أول مشروع هندسي كبير، فقد اعتمد هذا المشروع بشكل كبير على عمليات لتحديد موقع للمستودع وتصميمه، قامت على برامج بحوث رئيسية. والبحوث غالباً ما تؤدي إلى رؤى جديدة ومفاجآت، كما حدث في حالة جبل يوكا (National Research Council, 1990)؛ حيث أدت الاكتشافات الجديدة حول طبيعة الموقع والآثار المترتبة على بناء المستودع وتشغيله إلى تغييرات كبيرة في الافتراضات الأساسية لوزارة الطاقة وتصميماتها الهندسية (NWTRB, 1997, 1998, 2000, 2008). وفي سياق عملية المشاركة العامة التي نص عليها قانون السياسة البيئية الوطنية (Pub. L. 91-190) والتفاعلات العامة الأخرى، أدت هذه التغييرات بشكل غير مقصود إلى تقويض مصداقية وزارة الطاقة، التي تضررت أصلاً نتيجة لكون موقع جبل يوكا هو الموقع الوحيد الذي تجري دراسته بعد التعديلات على قانون سياسة النفايات النووية عام 1987. علاوة على ذلك، احتاجت وزارة الطاقة إلى سنوات طويلة للتخلص من ثقافتها المؤسسية القائمة على السرية والبدء بتقديم مزيد من الشفافية في عملها (National Research Council, 2001)، ولكن ثقة الرأي العام في ولاية نيفادا كانت قد تلاشت في ذلك الوقت (National Research Council, 2003). وجاء تمويل وزارة الطاقة لبناء المستودع من خلال عملية التخصيصات السنوية في الكونغرس، ما أبقى الوزارة مسؤولة أمام الكونغرس وحرمها في الوقت ذاته من السيطرة على توقيت العملية. وقد تفاوت هذا التمويل بين سنة وأخرى (Holt, 2010). وبرغم عمل الوزارة تحت تهديد الأحكام الإلزامية في قانون سياسة النفايات النووية التي تلزمها بتسلم النفايات، فقد أجرت بعض التغييرات في البرنامج مع اكتشافها معلومات جديدة، ولكنها في المحصلة بقيت تسعى نحو تحديد مدى ملاءمة الموقع وتقديم طلب الرخصة، حتى وإن أظهرت البحوث الحاجة إلى مزيد من التغييرات؛ ما أدى إلى مزيد من التراجع في ثقة الرأي العام في نيفادا بأن العملية عادلة وسليمة من الناحية التقنية.

من ناحية الخبرة التقنية، تمتلك وزارة الطاقة مجموعة أساسية من مديري البرامج والمشروعات المؤهلين، ولكنها اضطرت برغم ذلك إلى الاعتماد بشكل كامل تقريباً على استخدام مقاولين خارجيين، تحت إشراف مقاول إدارة وتشغيل، كان في البداية تي آر دبليو لنظم السلامة البيئية (TRW Environmental Safety Systems)، ثم شركة بيكتل سايك

(Bechtel SAIC Company) وأخيراً في نهاية 2008 شركة خدمات المستودع الأمريكي (USA Repository Services) (يشار إلى هذا الفريق باسم "الفريق المختار لإدارة مشروع جبل يوكا بقيادة شركة خدمات المستودع الأمريكي" 2008). كما استخدمت وزارة الطاقة بشكل واسع الموارد العلمية في المختبرات الوطنية، وخاصة مختبرات لورانس بيركلي وليفرمور وساندليا ولوس ألاموس. وطوال سنوات البرنامج، كان هناك شد متبادل بين مديري المشروعات من وزارة الطاقة ومقاوليها أولاً، ممن كانوا يركزون على الوفاء بالمواعيد النهائية التي حددها القانون، وبين الأوساط البحثية ثانياً، التي كانت تسعى لفهم أكبر للعمليات الفيزيائية التي ستحدد مدى ملاءمة الموقع لعزل النويدات المشعة عن البيئة لأكثر من 10,000 سنة. وتحدثت التقارير الصادرة من المجلس الوطني الأمريكي للبحوث خلال هذه الفترة عن العواقب السلبية المترتبة على تركيز البرنامج الأمريكي على مواعيد نهائية مصطنعة وجداول زمنية غير واقعية على حساب توسيع نطاق القبول العام وكسب المصداقية التقنية (National Research Council, 2001, 2003).

كما تبدلت القيادة في مقر وزارة الطاقة وداخل البرنامج مرات عدة، خلال هذه الفترة مع تغير إدارات الرؤساء الأمريكيين. ومن الصعب تقويم مدى صلة هذه التغييرات في القيادة بفشل البرنامج. ولكن وزارة الطاقة؛ بوصفها كمؤسسة بقيت ملتزمة بتنفيذ قانون سياسة النفايات النووية والمضي قدماً في عملية تحديد موقع المستودع في ظل جميع الإدارات الأمريكية.

هيئة تنظيم الطاقة النووية الأمريكية: لم نجد في الأدبيات التي اطلعنا عليها مواضع تم التشكيك فيها، في نزاهة هيئة تنظيم الطاقة النووية أو كفاءتها التقنية فيما يتعلق بدورها في تنظيم الوقود النووي المستنفد. وهذا يشمل دورها في الترخيص والإشراف المستمر على أحواض التخزين في الموقع والتخزين في البراميل الجافة، فضلاً عن مراجعتها لرخصة موقع جبل يوكا. وهيئة تنظيم الطاقة النووية هي وكالة مستقلة يترأسها خمسة مفوضين يعينهم الرئيس ويصدق تعيينهم مجلس الشيوخ. وهي بفضل استقلالها معزولة عن الضغوط السياسية، كما أن مهمتها لا تسمح بأي تعارض في المصالح؛ حيث تنص على: «تنظيم الاستخدام المدني في البلاد للموارد والمنتجات الجانبية والمواد النووية الخاصة من أجل ضمان

الحماية الكافية للصحة والسلامة العامة وتعزيز الدفاع المشترك والأمن وحماية البيئة» (NRC, 2010a). وفي عام 2000، قال ريتشارد ميسيرف الذي كان رئيس الهيئة آنذاك:

> ليس لهيئة تنظيم الطاقة النووية أي دور في الترويج لاستخدام التكنولوجيا النووية. ومع ذلك، فإننا ندرك أن الطريقة التي نؤدي بها عملنا قد يكون لها أثر كبير في الرأي العام. لذلك يجب أن نكون جهة تنظيمية صارمة ومستقلة وفاعلة، وأن يرانا الآخرون بهذه الصورة. وتتجلى الأهمية التي توليها الهيئة لالتزاماتها في هذا الصدد في حقيقة أن أحد الأهداف الرئيسية الأربعة في خططنا الاستراتيجية هو تعزيز ثقة الرأي العام بهيئة تنظيم الطاقة النووية (Meserve, 2000a).

يُعَين مفوضو هيئة تنظيم الطاقة النووية لمدة خمس سنوات، ولكن تعيينهم واستبدالهم لا يتم دفعة واحدة، بل على مراحل، وهذا يضمن استمرارية القيادة في الهيئة على المدى الطويل، برغم أن الهيئة عملت في كثير من الأحيان من دون اكتمال عدد المفوضين فيها. وتعزى استمرارية العمليات في الهيئة إلى استقرار فريقها من الموظفين المدنيين، برغم أن شيخوخة موظفيها التقنيين ستشكل تحدياً في حالة زيادة أعباء عمل الهيئة بشكل كبير عن المستويات الحالية (Murphy, 2007).

حتى صدور قرار ملاءمة الموقع في عام 2002، لعبت هيئة تنظيم الطاقة النووية دوراً من وراء الكواليس من خلال إجرائها مشاورات على مستوى الموظفين مع وزارة الطاقة في أثناء إعداد الوزارة للوثائق الضخمة المؤيدة لطلب ترخيص الموقع. وقد عكفت الهيئة على دراسة طلب ترخيص موقع جبل يوكا الذي تقدمت به وزارة الطاقة في عام 2008، إلا أن وزارة الطاقة أوقفت تلك العملية عندما سحبت الطلب في آذار/ مارس 2010، ولو أن هيئة تنظيم الطاقة النووية أتمت دراستها وأصدرت قراراً بالموافقة على الطلب لكانت فتحت الطريق أمام البدء ببناء المستودع في جبل يوكا (NRC, 2008a).

وكالة حماية البيئة الأمريكية: يحدد قانون سياسة النفايات النووية دوراً واحداً لوكالة حماية البيئة، وهو وضع معايير للمستودعات لحماية صحة الإنسان والبيئة من الإشعاع. وبعد صدور قانون سياسة الطاقة في عام 1992، وُجِّهت وكالة حماية البيئة لوضع معيار لجرعة الإشعاع لموقع جبل يوكا تحديداً بما يتفق مع التوصيات التقنية الصادرة عن

الأكاديمية الوطنية للعلوم. ولم تظهر داخل الوكالة أي حالات تعارض بين هذا الدور وبين مهماتها الأخرى. ومع ذلك، سعت الوكالة لأن يكون هذا المعيار منسجماً مع المعايير التي وضعتها للمحطة التجريبية لعزل النفايات في نيو مكسيكو، والتي سارت وفق عملية تنظيمية مختلفة تماماً عن العملية المحددة لجبل يوكا، فضلاً عن أحكام قانونية أخرى، مثل قانون مياه الشرب الآمنة (Pub. L. 93-523). وفي الواقع، فقد دفعت متطلبات قانون مياه الشرب الآمنة وكالة حماية البيئة إلى استنتاج ضرورة وجود معيار منفصل للمياه الجوفية بالإضافة إلى معيار لحماية الفرد ومنع التسلل البشري. وبعد عملية امتدت على مدى 20 عاماً تقريباً، وتضمنت اعتراضاً كبيراً أمام القضاء تقدمت به الصناعة وأطراف أخرى ضد معايير المياه الجوفية التي اقترحتها وكالة حماية البيئة في عام 2001 وضد المدة المقترحة للالتزام التنظيمي والبالغة 10,000 سنة، أصدرت وكالة حماية البيئة أخيراً المعايير النهائية المعدلة في أيلول/ سبتمبر 2008 (EPA, 2008).

لم نجد في الأدبيات أي مصدر يشكك في الكفاءة التقنية لموظفي وكالة حماية البيئة في عملية وضع المعايير لجبل يوكا. ويعزى الفرق الكبير بين النهج القياسي الذي تتبعه وكالة حماية البيئة عادة وبين المعايير الخاصة التي وضعتها لموقع جبل يوكا إلى الإطار الزمني الاستثنائي البالغ مليون سنة لتغطية مدة ذروة الخطر التي توصي بها الأكاديمية الوطنية للعلوم، وإلى الشكوك الكبيرة المحيطة بطرائق التعرض ونقاط النهاية خلال تلك المدة. وقد أدركت وكالة حماية البيئة وجود شكوك كبيرة حول الأداء على المدى الطويل، فاختارت استخدام التحليل الاحتمالي، وأقنعت هيئة تنظيم الطاقة النووية في نهاية المطاف بأن معيار الإثبات التقليدي الذي تستخدمه في منح تراخيص المحطات النووية والقائم على "الضمانات المعقولة" غير مناسب لأداء المستودع على المدى الطويل. وقبلت هيئة تنظيم الطاقة النووية هذه النقطة في عام 2001، واعتمدت نهج وكالة حماية البيئة القائم على "التوقع المعقول".[3]

مع تغير الإدارات الأمريكية، حدثت تغييرات في القيادة في مكتب الهواء والإشعاع في وكالة حماية البيئة، الذي كان مسؤولاً عن وضع معايير جبل يوكا، ولكن لم يكن لهذا تأثير يذكر في عملية صنع القرار داخل وكالة حماية البيئة فيما يتعلق بتلك المعايير.

أداء عمليات صنع القرار

الفئة الثانية من معايير التقويم التي نطبقها على الإطار المؤسسي الحالي تتعلق بأداء عمليات عدة لصنع القرار وردت في قانون سياسة النفايات النووية والتعديلات اللاحقة عليه. وتشمل العمليات الرئيسية العملية التي تتبعها وزارة الطاقة للوصول إلى توصية بشأن ملاءمة الموقع، والعملية التي تتبعها وكالة حماية البيئة لوضع المعيار التنظيمي لإطلاق النويدات المشعة للموقع المقترح، والعملية التي تتبعها هيئة تنظيم الطاقة النووية لمراجعة طلب رخصة الموقع والموافقة عليه (أو عدم الموافقة عليه). وتهدف هذه المعايير إلى بيان الأبعاد المختلفة لقبول الرأي العام:

- القدرة على حل النزاعات بين مختلف الأطراف والجهات المعنية.
- الشفافية لتمكين الجمهور من المشاركة في صنع القرار بعد الاطلاع على جميع المعلومات ذات الصلة.
- المصداقية التي تؤدي إلى ثقة الرأي العام في المعلومات الواردة من العملية.
- العدل والمساواة وهما اللذان يؤديان إلى ثقة الرأي العام في نتائج العملية.
- الالتزام بالمهل المحددة للتوصل إلى قرار.
- الكفاءة والفعالية في استخدام الأموال العامة والخاصة للتوصل إلى قرار.

وبحكم الضرورة، سنقتصر في تقويمنا لهذه المعايير على الميزات الأبرز لعمليات صنع القرار التي ركز عليها دعاة التغيير.

حل النزاعات: أدت العمليات الحالية لصنع القرار إلى الكثير من النزاعات التي تثبت اليوم صعوبة أو استحالة حلها. وكان النزاع الأبرز بين وزارة الطاقة وولاية نيفادا. فحتى قبل إقرار التعديلات على قانون سياسة النفايات النووية عام 1987، بدأت معظم القيادات السياسية في ولاية نيفادا في تصعيد معارضتها لاختيار جبل يوكا موقعاً لأول

مستودع نفايات في البلاد (Nuclear Waste Project Office, 1998). وفي عام 2002، اتبعت الولاية الإجراءات التي نص عليها قانون سياسة النفايات النووية فأصدرت إشعاراً رسمياً تعترض فيه على قرار وزارة الطاقة بخصوص ملاءمة الموقع (Guinn, 2002). وفي ظل غياب آليات قابلة للتطبيق لحل النزاعات بموجب قانون سياسة النفايات النووية، انتقل النزاع إلى المحاكم في عام 2002 عندما صدر قرار ملاءمة الموقع، ومازال فيها حتى اليوم. وبرغم أن المحكمة رفضت في عام 2004 جميع الحجج ضد شرعية اختيار الموقع،[4] مايزال النزاع بلا حل. كما رفعت ولاية نيفادا دعاوى أخرى ضد وزارة الطاقة تتعلق بمعيار الإشعاع وحقوق المياه وطرائق النقل وإتاحة المعلومات للجمهور وتمويل الإشراف.[5]

ونشب نزاع رئيسي ثانٍ بين وكالة حماية البيئة ووزارة الطاقة. فقد أنفقت وزارة الطاقة مليارات الدولارات على وضع تصميم لعزل النفايات وتنقيحه، يقوم على افتراضات معينة بشأن فعالية الحواجز الطبيعية والهندسية، وذلك قبل معرفة معيار أداء التعرض للنويدات المشعة الذي ستصدره وكالة حماية البيئة في نهاية المطاف وتقره المحاكم. وقبيل صدور المعيار النهائي لوكالة حماية البيئة في عام 2008 (EPA, 2008)، اعترضت وزارة الطاقة على ذلك المعيار بناء على ثلاثة أسباب: أولاً، رأت وزارة الطاقة أن معيار التعرض للإشعاع الذي اقترحته وكالة حماية البيئة والبالغ 15 ميليريماً* في السنة يمثل تشديداً لا ضرورة له بالمقارنة إلى معيار 25 ميليريماً في السنة المطبق على نطاق واسع على المنشآت النووية الأخرى (وهو موقف اتخذته أيضاً هيئة تنظيم الطاقة النووية بشكل مستقل). ثانياً، اعترضت وزارة الطاقة، مدعومة بدراسة صادرة عن المجلس الوطني للبحوث (National Research Council, 1995)، على الشرط الإضافي الذي وضعته وكالة حماية البيئة فيما يتعلق بنوعية المياه الجوفية، والذي كانت وكالة حماية البيئة تعتقد أنها ملزمة بوضعه بموجب قانون مياه الشرب الآمنة (EPA, 2008). وثالثاً، اعترضت وزارة الطاقة على تمديد فترة الالتزام إلى مليون سنة وفقاً لتوصية الأكاديمية الوطنية للعلوم التي نفذتها محكمة الاستئناف في مقاطعة كولومبيا.[6]

---

* ميليريم millirem، يعادل 1/ 1000 ريم rem؛ وهو وحدة لقياس أثر الإشعاع في الأجسام الحية.

الشفافية والمصداقية: نظراً إلى الارتباط الوثيق بين شفافية أي مؤسسة عامة في ممارسة أعمالها ومصداقيتها في عيون الجمهور، سننظر في هذين المعيارين معاً. ففي سياق تحديد موقع المستودع، تشير الشفافية إلى قدرة الجمهور على فهم العمليات ونتائج البحوث وعواقب نشاطات وزارة الطاقة. وفي أوائل ثمانينيات القرن العشرين، عقدت وزارة الطاقة الكثير من الجلسات العلنية التي ناقشت فيها وضع المبادئ التوجيهية لتحديد المواقع والمواقع المقترحة، وذلك في المراحل الأولى من عملية تحديد الموقع التي نص عليها قانون سياسة النفايات النووية لعام 1982. وقد سمحت الجلسات بسماع تعليقات الجمهور، ولكنها لم تسمح بحوار يذكر بين مسؤولي وزارة الطاقة والجمهور. وبعد اختيار ثلاثة مواقع لدراستها في عام 1986 (جبل يوكا في نيفادا، ومحمية هانفورد في واشنطن، ومقاطعة ديف سميث في ولاية تكساس)، عرضت وزارة الطاقة الدخول في مفاوضات لإبرام اتفاقية تشاور وتعاون مع كل من الولايات الثلاث المعنية (وفقاً لما نص عليه القانون)، ولكن لم تقبل أي منها ذلك العرض. ولم تبدأ إدارة مشروع جبل يوكا في وزارة الطاقة بعقد جلسات علنية منتظمة للتواصل والتفاعل مع الجمهور في نيفادا إلا بعد تشكيل مجلس المراجعة التقنية للنفايات النووية في الولايات المتحدة بعد تعديل قانون سياسة النفايات النووية في عام 1987.

كان لانعدام الشفافية في وزارة الطاقة، وخاصة في الأيام الأولى من البرنامج، عواقب متوقعة، من حيث تقويض مصداقية الوزارة في نظر الرأي العام في ولاية نيفادا والأوساط المهتمة بالبيئة (La Porte and Metlay, 1996). وواجهت وزارة الطاقة صعوبة في التوفيق بين دورها كوكالة بحوث، ودورها بموجب قانون سياسة النفايات النووية كجهة تطلب رخصة لموقع مستودع نفايات، وأخيراً دورها كمالك للنفايات. ونتيجة لذلك، حافظت وزارة الطاقة على مواقفها بشأن قضايا تصميم المستودع، ولكنها اضطرت لاحقاً إلى تغييرها بشكل كامل عندما أظهرت البحوث الجديدة عواقبها غير المرغوب فيها. ومن أمثلة ذلك: الافتراضات الأولية الخاطئة حول معدلات تسرب المياه من خلال المنطقة غير المشبعة (NWTRB, 2000)، وسلامة طبقة الطف البركاني [حجر مسامي يتشكل من رماد البراكين] التي كان يفترض أن يبنى فيها المستودع أصلاً (NWTRB, 2000)، وملاءمة المعدن المستخدم لصناعة حاويات النفايات (NWTRB, 1998, 1999, 2003).

ففي كل من هذه الحالات، اضطرت وزارة الطاقة إلى تغيير موقفها عندما تعرضت لضغط من مجلس المراجعة التقنية للنفايات النووية وولاية نيفادا وجهات أخرى. هذه التغييرات في المواقف أدت إلى المزيد من التراجع في ثقة الرأي العام في ولاية نيفادا بوزارة الطاقة، كما كان لها أثر مماثل في الأوساط العلمية المهتمة.

من الجدير بالذكر أن هيئة تنظيم الطاقة النووية اعتمدت موقفاً مختلفاً تماماً تجاه الشفافية والمشاركة العامة (Meserve, 2000a, 2000b)؛ حيث أدركت العلاقة بين قبول الرأي العام بالخطر والانطباع العام عن مصداقية المؤسسة المعنية (La Porte and Metlay, 1996). ونتيجة لما قامت به هيئة تنظيم الطاقة النووية على مدى العقدين الماضيين فيما يتعلق بالتخلص من الوقود المستنفد، فهي ليست عرضة للتشكيك في مصداقيتها في أوساط الجمهور، كما هي حال وزارة الطاقة.

العدل والمساواة: في عام 1982 رأى الكونغرس أن المساواة بين المناطق أمر مهم، فدعا إلى بناء مستودعين، واحد في الشرق وواحد في الغرب. إلا أن كفة النفعية السياسية رجحت على كفة المساواة بين المناطق في عام 1987؛ حيث وقع الاختيار على جبل يوكا ليكون الموقع الوحيد المرشح، برغم أن معظم الوقود المستنفد في الولايات المتحدة يُنتج ويخزن في محطات الطاقة النووية الموجودة في الشرق والغرب الأوسط، ولا يوجد أي منها في نيفادا (NRC, 2010b). ومنذ عام 1987، لم يتم النظر في أي موقع آخر. وليس مستغرباً أن تنظر نيفادا إلى اختيار جبل يوكا؛ بوصفه موقعاً وحيداً لتقويمه عام 1987؛ بوصفه أمراً مجحفاً؛ إذ لا توجد طريقة مشروعة تستطيع من خلالها وزارة الطاقة أن تقرر أن موقع جبل يوكا غير مناسب في عملية لا يوجد فيها إلا خيار واحد. وحتى وجود مجلس المراجعة التقنية للنفايات النووية، بموجب التعديلات على قانون سياسة النفايات النووية عام 1987 لإضفاء شيء من المصداقية على عملية دراسة الموقع، لم يكن كافياً لتجاوز حقيقة أن جبل يوكا كان الخيار الوحيد في البلاد لإقامة مستودع دائم للنفايات. كما يمكن الولايات الأخرى التي فيها كمية كبيرة من الوقود المستنفد، مخزنة في مواقع المحطات النووية أن تقول بصورة مشروعة: إن مطالبتها بحمل جزء من العبء تنطوي على إجحاف.

الالتزام بالمهل المحددة: لم تلتزم وزارة الطاقة بأي من المهل التي حددها الكونغرس في قانون سياسة النفايات النووية. ولم يقتصر أثر الفشل في الالتزام بالمواعيد النهائية على تقويض مصداقية وزارة الطاقة فحسب، بل أدى إلى عدم وفاء وزارة الطاقة بالتزامها الذي نص عليه القانون بتسلم النفايات من شركات المرافق في عام 1998؛ ما أدى إلى رفع دعاوى قضائية وصدور أحكام تعويض مازالت قائمة حتى اليوم (Garvey, 2009). وبالنظر إلى الوراء نرى أن المهل التي فرضها قانون سياسة النفايات النووية كانت غير قابلة للتطبيق نظراً إلى تعقيد الجانب التقني. كما تخلفت وكالة حماية البيئة عن الموعد النهائي الأصلي لإصدار معيار التعرض للإشعاع في موقع محدد. ففي عام 1992، ألزم الكونغرس وكالة حماية البيئة بوضع معيار بعد سنة واحدة من تسلمها التوجيهات التي وضعتها الأكاديمية الوطنية للعلوم، إلا أن العملية استغرقت 15 سنة؛ حيث أصدرت الأكاديمية الوطنية للعلوم تقريرها في عام 1994 (National Academy of Sciences, 1994)، ولكن وكالة حماية البيئة لم تصدر معيارها المقترح الأول حتى عام 2001. وبعد اعتراض قانوني انتهى بصدور قرار من محكمة الاستئناف في عام 2004، أصدرت وكالة حماية البيئة معيارها النهائي في 30 أيلول/ سبتمبر 2008 (EPA, 2008).

وهكذا فإن عدم الالتزام بالمهل المحددة هو من أعراض الفشل وسبب من أسبابه في العملية التي نص عليها قانون سياسة النفايات النووية. وقد حدد الكونغرس المهل الواردة في ذلك القانون دون فهم كامل لتعقيدات المهمات البحثية، والمضاعفات التي ستترتب على تصميم مستودع في وقت ماتزال تتكشف فيه حقائق جيولوجية وعلمية أخرى، وعواقب عدم وجود قبول لدى الرأي العام.

الكفاءة والفعالية في استخدام الأموال العامة: من الصعب تقويم الكفاءة والفعالية الاقتصادية في عملية هي الأولى من نوعها. وما يمكن قوله هو أن الحكومة الفيدرالية أنفقت منذ عام 1982 أكثر من 13 مليار دولار (بحسب قيمة الدولار في عام 2007) من الأموال المودعة في صندوق النفايات النووية، وهي التي تم جمعها من دافعي فواتير الكهرباء. وقد رفعت شركات المرافق دعاوى ضد وزارة الطاقة للحصول على تعويضات؛ ما أدى إلى عجز وزارة الطاقة عن تسلم الوقود المستنفد

نتيجة لعدم الوفاء بموعد افتتاح المستودع الذي تحدده قانون سياسة النفايات النووية. وتشير تقديرات وزارة الطاقة إلى أن تسوية هذه الدعاوى ستؤدي إلى تراكم تكاليف تقارب 12.3 مليار دولار بحلول عام 2020 (GAO, 2009). وإذا لم يفتتح مستودع جبل يوكا بحلول عام 2020، فسيكون مجموع ما أنفقته الحكومة الفيدرالية حوالي 25 مليار دولار.

الجوانب التي يجب أخذها في الحسبان للمضي قدماً

في ضوء السياسة الوطنية الحالية بشأن تحديد موقع للمستودع الدائم، يشير تقويمنا الموجز إلى أن وزارة الطاقة ووكالة حماية البيئة وهيئة تنظيم الطاقة النووية اتبعت إلى حد كبير توجيهات الكونغرس، وإن كان بوتيرة أبطأ بكثير مما كان متوقعاً في الأصل، وبتكاليف أعلى بكثير مع ارتكاب بعض الأخطاء الكبيرة في حالة كل من وزارة الطاقة ووكالة حماية البيئة (مثل خطأ وزارة الطاقة الكبير في حسابات تصميم المستودع ليتوافق مع الخصائص الفيزيائية لجبل يوكا وتعثر وكالة حماية البيئة في وضعها للمعيار). ولكن يبدو أن هناك عوامل أخرى لعبت دوراً في عدم تحقيق النتيجة المطلوبة أكبر من دور الكفاءة التقنية والإدارية، وهذه العوامل هي:

- انهيار الإجماع الأصلي وفقاً لقانون سياسة النفايات النووية على فكرة إنشاء مستودعين واحد في الشرق وآخر في الغرب، وذلك في عام 1986، والتركيز بدلاً من ذلك على منطقة جبل يوكا في التعديلات على قانون سياسة النفايات النووية عام 1987.

- ضعف الحوافز وتعارض المصالح داخل وزارة الطاقة؛ ما أدى إلى فقدان ثقة الرأي العام ووصول عملية صنع القرار إلى طريق مسدودة.

- تركيز السياسة الشاملة التي عملت بموجبها وزارة الطاقة بعد تعديلات قانون سياسة النفايات النووية في عام 1987 على تحديد موقع المستودع على حساب وجود خطة أكثر شمولاً لتخزين طويل الأجل فوق الأرض ومقاربة تدريجية لبناء مستودعات دائمة في مواقع عدة.

التغييرات في الإطار المؤسسي، يجب أن يُدرّس بعناية في سياق السياسة الوطنية لإدارة الوقود المستنفد. سنناقش في الفصل الرابع أربع سياسات استراتيجية تتطلب كل منها درجات متفاوتة من التغيير في الترتيبات المؤسسية لضمان تنفيذها بنجاح. ولكن، بناء على تحليلنا، هناك تغييران رئيسيان يجب دراستهما بشكل معمق لمعرفة إن كانا سيسهلان أي مسار يختاره الكونغرس والإدارة، بما في ذلك الإبقاء على الوضع الحالي:

- حل مشكلة ملكية الوقود المستنفد وتمويل توسيع مرافق التخزين في الموقع في غياب مستودع جيولوجي دائم.
- إعادة تقويم مسؤوليات المؤسسات في إدارة موارد الوقود المستنفد.

جميع استراتيجيات إدارة الوقود المستنفد التي سنناقشها في الفصل التالي تتطلب من شركات المرافق المحافظة على مرافق التخزين في الموقع وتوسيعها لمدة طويلة. وهذا يعني أن الالتزامات المالية المترتبة على الحكومة جراء عدم تسلم الوقود المستنفد المخزن في المحطات العاملة والمفككة ستبقى في ازدياد ما لم يحدث تغيير في السياسات أو الممارسات. فشركات المرافق لم تخصص مبالغ لتمويل نفقات التخزين الطويل الأجل كما فعلت عندما استخدمت حسابات الضمان لتغطية تكاليف تفكيك المحطات. وكما يَلحظ أوينغ وسينغر وويلسون (Ewing, Singer, and Wilson, 2009) فإن عدم توافر أموال مخصصة لدى شركات المرافق لإدارة تخزين الوقود المستنفد لأمد طويل كان نتيجة للافتراض الوارد في قانون سياسة النفايات النووية بأن الوقود المستنفد سيُنقل بسرعة نسبياً من مواقع المفاعلات إلى مستودع دائم قبل تفكيك المحطات. وفي الواقع لعب هذا الافتراض دوراً محورياً في إرغام الحكومة على التركيز على المهمات الصعبة المتمثلة في تحديد الموقع وترخيصه.

لا تستطيع الحكومة الفيدرالية أن تغير من جانب واحد بنود العقود الموقعة مع شركات المرافق بخصوص تسلم النفايات، فالعقود مازالت نافذة وقد رُفعت حتى الآن 71 دعوى ضد وزارة الطاقة لإخلالها بالعقد (Garvey, 2009). ولكن أوينغ وسينغر وويلسون (Ewing, Singer, and Wilson, 2009) يقترحون إجراء مجموعة من

التغييرات على قانون سياسة النفايات النووية من شأنها أن توفر لشركات المرافق طريقة بديلة لتمويل التخزين في الموقع لمدد طويلة، وفي الوقت نفسه تعفي الحكومة من التزامها بتسلم الوقود المستنفد بشكل فوري؛ حيث يمكن إبرام ترتيب يخضع لإشراف صارم من هيئة تنظيم الطاقة النووية تقوم بموجبه الحكومة بوضع الأموال اللازمة للتخزين طويل الأجل في حساب ضمان منفصل لكل مفاعل مع احتساب فائدة عليها. ويشير أوينغ وسينغر وويلسون إلى أن الشروط التي سيجري بموجبها هذا التغيير قد تختلف بين المحطات القائمة (اختياري) والمحطات الجديدة أو المعاد ترخيصها (إلزامي). وبهذا تبقى شركات المرافق مالكة للنفايات ولكنها تتحكم أيضاً بالتمويل ويكون لديها حوافز لإدارة تخزين النفايات بكفاءة، بما في ذلك نقلها من المحطات التي جرى تفكيكها إلى المحطات التي مازالت تعمل. وتحقيقاً لهذه الغاية، يمكن الكونغرس والولايات منح شركات المرافق مزيداً من المرونة في اختيار موقع التخزين السطحي للوقود المستنفد على المدى الطويل، مادام من الممكن تحسين التكلفة الاقتصادية والسلامة عن طريق تجميع الوقود المستنفد في بعض المواقع داخل الولاية الواحدة أو عبر الحدود بين الولايات (Ewing, Singer, and Wilson, 2009). وهذا قد يكون مفيداً بشكل خاص عند تفكيك بعض المحطات النووية، كما هو متوقع، خلال السنوات القليلة المقبلة. فتغيير هذا الجانب من القانون سيوفر مرونة أكبر بكثير للحكومة وللصناعة وربما يسمح لها بتوفير في التكاليف، مع إزالة عقبة كبيرة تواجه الاستراتيجيات التي تتطلب المزيد من الوقت للبحث والتطوير والتنفيذ.

هذه التغييرات في التمويل وإدارة التخزين في الموقع قد تكون ضرورية، ولكنها تبقى غير كافية لحل مشكلات تسلم النفايات بشكل كامل. ولكي ينجح هذا المنهج، من المرجح أن يحتاج الرأي العام والصناعة إلى صوغ بنود في القانون توفر ضمانات يوثق بها؛ لتحقيق تقدم نحو تسلم الحكومة الفيدرالية الوقود المستنفد خلال العقود القليلة المقبلة (عن طريق بناء مستودع دائم أو منشأة تخزين مركزي مؤقت أو منشأة إعادة تدوير) من خلال تمويل خاص وعمليات تنظيم وإدارة تتسم بالشفافية والاستدامة والكفاءة.

وللتخفيف من آثار تراجع ثقة الرأي العام وضعف الحوافز في الإطار الحالي، من المرجح أن قيام مؤسسة جديدة خارج وزارة الطاقة بإدارة أي استراتيجية جديدة لإدارة الوقود المستنفد سيمنحها قدراً أكبر من المصداقية. ويمكن أن تتخذ هذه المؤسسة أشكالاً مختلفة: عامة أو خاصة أو مشتركة بين القطاعين العام والخاص، كأن تكون شركة عامة على سبيل المثال. وقد ظهرت فكرة وجود شركة عامة وصندوق دائم يقدم لها الدعم على شكل اقتراح تقدم به مؤخراً كل من أوينغ وسينغر وويلسون (Ewing, Singer, and Wilson, 2009) وستيورات (Stewart, 2008)، ولكنها فعلياً تعود إلى عام 1985 عندما أعلنت عنها الهيئة الاستشارية للوسائل البديلة للتمويل وإدارة النفايات المشعة (Advisory Panel on Alternative Means of Financing and Managing Radioactive Waste Facilities, 1984). وخلصت تلك الدراسة، التي قامت وزارة الطاقة بتحديثها في عام 2001 (DOE, 2001)، إلى أن نموذج الهيئة الفيدرالية المستقلة (مثل: مؤسسة البريد الأمريكية ومؤسسة ضمان الودائع الفيدرالية) سيوفر أكبر قدر من المرونة والقدرة على التكيف، وهو مستخدم بشكل عام في الحالات التي تحتكر فيها الحكومة تقديم خدمة محلية. هذا النموذج قد يكون مناسباً جداً لإدارة الوقود النووي التجاري المستنفد. ولا يلزم في هذه المرحلة إجراء تغييرات جوهرية في هيئة تنظيم الطاقة النووية أو وكالة حماية البيئة. وعندما يتخذ الكونغرس خطوات لنقل إدارة برنامج المستودع إلى جهة أخرى غير وزارة الطاقة سيكون ذلك بناء على رأي مفاده أنه عندما تضيع ثقة الجمهور فلا يمكن استعادتها بسهولة من خلال المحافظة على تصميم المؤسسات في الوضع الراهن. ولا يمكن التثبت من صحة هذا الرأي، ولكن لابورت وميتلاي (La Porte and Metlay, 1996) والكثير من مصادر العلوم الاجتماعية التي استشهدا بها تضفي عليه نوعاً من المصداقية.

نبين في الفصل الآتي الخطوط العريضة لسياسات بديلة عدة لإدارة الوقود النووي المستنفد في الولايات المتحدة، لكل منها آثار يجب أخذها في الحسبان عند النظر في إجراء تغييرات في الإطار المؤسسي الحالي في الولايات المتحدة الأمريكية. فالترتيبات الحالية التي وضعت في عام 1982 لتمكين مشروع إدارة الوقود النووي المستنفد الذي تحيط به الشكوك ويخضع لتقلبات الرأي العام أثبتت الأيام أنها تعرقل المشروع أكثر مما تمهد له الطريق. وهذه الملاحظة وحدها كافية لإعادة النظر في الخيارات المتاحة لتغيير الأطر المؤسسية.

الفصل الرابع

انعكاسات الاستراتيجيات البديلة على السياسات

في أعقاب إلغاء تمويل مشروع جبل يوكا وسحب طلب ترخيصه المقدم إلى هيئة تنظيم الطاقة النووية، باتت هناك حاجة إلى صوغ استراتيجية وطنية جديدة لإدارة الوقود النووي المستنفد. وبينما نفهم جيداً الكثير من العناصر الأساسية التقنية والمؤسسية التي ستدخل في صوغ الاستراتيجية الجديدة، فمن الممكن الجمع بين هذه العناصر بطرائق مختلفة لكل واحدة منها تأثيرات مختلفة في السياسات؛ وللمساعدة في إثراء المداولات حول السياسة، قمنا بصوغ اقتراحات لأربع استراتيجيات أساسية لإدارة الوقود المستنفد يمكن أن تختار الولايات المتحدة واحدة منها. وليس القصد من هذه الاستراتيجيات تقديم قائمة كاملة للخيارات المتاحة، ولكنها اختيرت، بحيث تغطي مجموعة من الأساليب، وتوضح بعض انعكاساتها المهمة على السياسات. يلخص الجدول (4-1) هذه الاستراتيجيات والإجراءات اللازمة في كل منها على المدى القصير (5-10 سنوات) فيما يتعلق بتخزين الوقود وإعادة تدويره والتخلص منه.

الجدول (4-1)

استراتيجيات إدارة الوقود النووي المستنفد

الاستراتيجية	الإجراءات القصيرة الأجل		
	التخزين	إعادة التدوير	التخلص
تسريع العمل على مستودع جبل يوكا	مواصلة التخزين في المواقع إلى أن تصبح يصبح مستودع جبل يوكا جاهزاً	المحافظة على المستوى الحالي من بحوث دورة الوقود المتقدمة	فتح مستودع جبل يوكا
تطوير التخزين المركزي المؤقت إلى جانب التخلص الجيولوجي الدائم	تطوير مرافق تخزين مركزية	المحافظة على المستوى الحالي من بحوث دورة الوقود المتقدمة	البحث عن مواقع بديلة
السعي لتنفيذ دورات الوقود المتقدمة	مواصلة توسيع مرافق التخزين في الموقع أو تطوير مرافق تخزين مركزية	التوسع بقوة في جهود تطوير دورة الوقود المتقدمة	عدم الالتزام بأي خطة زمنية وبأي موقع محدد
الاستمرار في التخزين في الموقع وتوسيع مرافقه	مواصلة توسيع مرافق التخزين في الموقع	المحافظة على المستوى الحالي من بحوث دورة الوقود المتقدمة	عدم الالتزام بأي خطة زمنية وبأي موقع محدد

سندرس كلاً من هذه الاستراتيجيات في ضوء المعايير والتحليلات الواردة في الفصول السابقة. وعند النظر في كل استراتيجية، سنناقش الشروط أو الأولويات اللازم توافرها لكي تكون هي الاستراتيجية المثلى، والتغييرات المؤسسية الممكنة التي من شأنها تسهيل نجاحها. كما سننظر في انعكاسات كل من هذه الخيارات على مستقبل الطاقة النووية في الولايات المتحدة وصالح الأجيال القادمة.

قد يكون لسياسات الوقود النووي المستنفد تأثير مهم في الدور المستقبلي للطاقة النووية في الولايات المتحدة. فأحد العوامل المهمة التي تسهم في إحجام الصناعة النووية عن الاستثمار في محطات نووية جديدة هو عدم قدرتها على التخلص من ملكية الوقود المستنفد وحيازته المادية (Nuclear Energy Institute, 2010; McCullum, 2009). وللكثير من الولايات والحكومات المحلية وجهات نظر مماثلة؛ حيث تحد من كمية النفايات التي يمكن تخزينها في موقع المحطات النووية أو تشترط إنشاء مستودع دائم قبل منح الموافقة على إنشاء محطة طاقة نووية جديدة. فمثلاً تشترط كل من: كاليفورنيا وأوريغون وويسكونسن افتتاح مستودع دائم قبل بناء محطات طاقة نووية جديدة (Farsetta, 2009). وفي الوقت ذاته فإن ارتفاع التكاليف وصعوبات الحصول على التأمين لمحطات الطاقة النووية الجديدة يعوق أيضاً نمو الطاقة النووية؛ ومن ثم، لا بد من توضيح أثر كل سياسة لإدارة الوقود المستنفد في مستقبل الطاقة النووية في سياق هذه التأثيرات وغيرها من التأثيرات المهمة.

كما أن للاستراتيجيات انعكاسات مختلفة على الأجيال القادمة. وكل منها يؤجل قدراً مختلفاً من عمليات صنع القرار والتطوير التقني والتكاليف المالية والسياسية للأجيال القادمة. وهذا التأجيل يثير مسألة المساواة بين الأجيال: فأحد البدائل قد يكون له فوائد على المدى القريب ومشكلات على المدى البعيد، أو بالعكس قد يكون مكلفاً ويتطلب اتخاذ قرارات صعبة في المدى القريب، ولكنه يترك مشكلات أقل للأجيال القادمة. وعند النظر في مسألة التوقيت وتقاسم المسؤوليات بين الأجيال، من المهم أن ندرك أن التخزين في الموقع سيستمر خلال العقد المقبل على الأقل بغض النظر عن الاستراتيجية المختارة، وقد يستمر طوال عقود عدة في بعض الاستراتيجيات. وفي حد أدنى، سيبقى التخزين في الموقع ضرورياً

إلى حين توافر منشأة تخزين مركزي مؤقت أو مستودع جيولوجي دائم أو منشأة لإعادة تدوير الوقود المستنفد. وبرغم استحالة التنبؤ بالجداول الزمنية بشيء من الثقة، فإن التجارب الماضية والحالة الراهنة للتكنولوجيا تشير إلى أن ترخيص موقع جبل يوكا أو أي منشأة تخزين مركزي مؤقت سيستغرق ما لا يقل عن عقد من الزمن، وبناء مستودع جيولوجي دائم جديد سيتطلب عقدين أو أكثر، أما تنفيذ دورات الوقود المتقدمة فسيحتاج إلى عقود عدة، وعلاوة على ذلك، فإن التخزين في الموقع سيستمر حتى بعد توافر القدرة على التخزين المركزي للوقود المستنفد أو التخلص منه أو تدويره، إما بسبب تأجيل نقل الوقود المستنفد من محطات الطاقة بعد جاهزية المنشآت (مثلاً لإبقاء الوقود المستنفد قريباً من أجل احتمال إعادة تدويره أو لتقليص الحرارة الصادرة عنه قبل التخلص منه) أو ببساطة لأن نقل جميع كميات الوقود المستنفد المتراكمة في مرافق التخزين حتى بدء عملية النقل سيستغرق عقوداً طويلة (DOE, 2008b; Office of Technology Assessment, 1985).

تسريع العمل على مستودع جبل يوكا

هذا البديل يقتضي تفعيل مشروع مستودع جبل يوكا وجعل الموقع جاهزاً لتسلم الوقود النووي المستنفد في أسرع وقت ممكن. وبينما تنطوي هذه الاستراتيجية على التسريع بتجهيز موقع جبل يوكا لتسلم الوقود المستنفد، فهي لا تعني بالضرورة المضي نحو التخلص الفوري، فمن الممكن تخزين بعض الوقود المستنفد أو كله في موقع جبل يوكا بشكل يسمح باسترجاعه، كما يمكن الاستمرار في تخزينه في محطات الطاقة النووية. وهذه هي الاستراتيجية التي كانت وزارة الطاقة تتبعها حتى عام 2009 للالتزام بقانون سياسة النفايات النووية؛ أي إنها تمثل خيار "الاستمرار على المسار نفسه". ويظهر تحليلنا أن التكنولوجيات والخطط الحالية للتخلص الجيولوجي يمكن أن تكون سليمة وآمنة وقابلة للتنفيذ من الناحية التقنية وذات تكلفة متوسطة. والمشكلة الرئيسية التي تواجه هذا الخيار هي المعارضة القوية في ولاية نيفادا لاستخدام جبل يوكا مستودعاً للوقود المستنفد.

سيكون المضي قدماً في مشروع جبل يوكا هو أسرع الطرائق لإزالة عقبة رئيسية أمام التوسع في صناعة الطاقة النووية في الولايات المتحدة. وترخيص هذا المشروع وبدء

عملية تسلم الوقود المستنفد المخزن لدى شركات المرافق سيسمح بتنفيذ عقود التخلص من الوقود، وهذا سيزيد من استعداد صناعة الطاقة النووية للاستثمار في قدرات توليد جديدة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن وجود مستودع جيولوجي دائم مرخص سيزيد من المرونة في إدارة الوقود المستنفد من خلال تسهيل تطوير مرافق التخزين المركزي المؤقت؛ حيث توقفت جهود القطاع الخاص والحكومة لتطوير مرافق التخزين المركزي المؤقت بحجة أن أي منشأة للتخزين المؤقت عرضة لأن تصبح في الواقع منشأة للتخزين الدائم ما لم يوجد مستودع مرخص. وهكذا فإن الشروع في بناء مستودع في جبل يوكا وبدء تشغيله يتوافق مع فكرة الاستمرار في تخزين أكبر كمية مقبولة من الوقود المستنفد إلى حين حسم الجوانب غير الواضحة المتعلقة بطريقة التخلص منه في نهاية المطاف.

سيؤدي تطوير مستودع جيولوجي دائم في المدى القريب إلى تسهيل الأمور نسبياً على الأجيال القادمة: فهو يوفر درجة عالية من السلامة والأمن، ويسمح بتطوير محطات جديدة للطاقة النووية بعد زوال عقبة التخلص من الوقود المستنفد، ويحل مشكلات قبول الرأي العام، ويريح الأجيال القادمة من عبء التكاليف الرئيسية. لذلك فهو يتفق مع مبدأ مهم من مبادئ سياسة إدارة الوقود المستنفد حتى هذه اللحظة، وهو المبدأ القائل بأن الجيل الذي يستفيد من النشاطات التي تنتج النفايات النووية يجب أن يتحمل أعباء التخلص من تلك النفايات. ومن العوائق المحتملة في هذا الخيار هو أنه يوجب المضي قدماً بالاعتماد على التكنولوجيات والخطط الحالية للتخلص من الوقود المستنفد. ولكن لا توجد حتى اليوم أدلة تثبت أن التكنولوجيا الحالية للتخلص من الوقود المستنفد غير ملائمة. وفي مطلق الأحوال، ليس من الواضح إن كان ظهور تكنولوجيا للتخلص من الوقود المستنفد أكثر أماناً مما تشترطه اللوائح الحالية سيسهم في تقليص المصاعب السياسية التي تواجه عملية تحديد موقع للمستودع. وثمة حجة أخرى تتصل بهذا الموضوع وهي أن التكنولوجيا قد تتقدم إلى نقطة يصبح معها من المفيد إعادة تدوير الوقود المستنفد، ولكن التخلص منه بشكل نهائي سيقضي على إمكانية الاستفادة من الطاقة الكامنة المتبقية فيه. والرد على هذه الحجة هو أن مستودع جبل يوكا لن يغلق بشكل نهائي قبل مرور 100 سنة، ويمكن تأخيره أكثر من ذلك إذا لزم الأمر.

ولذا، فإن المضي قدماً في مشروع جبل يوكا هو الخيار المفضل إذا كانت الأولوية هي لحل مشكلة إدارة الوقود المستنفد في أسرع وقت ممكن بدلاً من تركها للمستقبل، وتمهيد الطريق لنمو الطاقة النووية في الولايات المتحدة. وعلى حين أن الإطار المؤسسي الحالي وُضِع لدعم هذا الخيار، فالتاريخ الصاخب لمشروع جبل يوكا، الذي انتهى بإلغائه، يشير إلى أنه من المرجح أن تكون هناك حاجة إلى تغييرات مؤسسية لإحيائه. وربما لا يوجد الآن أي تغيير مؤسسي يضمن القضاء على المعارضة القوية للمشروع في ولاية نيفادا، ولكن نقل مسؤولية البناء والتشغيل لمستودع جبل يوكا من وزارة الطاقة إلى مؤسسة جديدة (ربما وكالة حكومية مختلفة أو شركة حكومية أو شركة خاصة) سيساعد في استعادة ثقة الرأي العام في المشروع.

تطوير التخزين المركزي المؤقت إلى جانب التخلص الجيولوجي الدائم

هذه الاستراتيجية تمثل نهجاً مزدوجاً ينطوي على نقل الوقود المستنفد إلى منشأة فيدرالية واحدة أو أكثر للتخزين المركزي المؤقت مع تطوير مستودع جيولوجي دائم للتخلص النهائي. وهو نهج جذاب لأنه يتسم بالمرونة ويوفر بديلاً يحتمل أن يكون أبسط بكثير من التخلص المباشر في جبل يوكا للوفاء بسرعة بعقود التخلص من الوقود المستنفد. وبمقارنة منشأة التخزين المركزي المؤقت إلى المستودع الجيولوجي الدائم نجد أن الأولى أبسط من الناحية التقنية، ويمكن أن تبنى بسرعة، وتسمح باسترجاع الوقود المستنفد منها. كما يشير تحليلنا إلى أن التخزين المركزي المؤقت ذو تكلفة معقولة وسهل من الناحية التقنية. فالسويد، مثلاً، تشغل موقعاً للتخزين المؤقت تحت الأرض منذ عام 1985. وبالمقارنة إلى التخزين في الموقع، فإن التخزين المركزي المؤقت ذو تكلفة قليلة وله فوائد من ناحية السلامة؛ بسبب وفورات الحجم المرتبطة بالحراسة والإدارة المركزية لكميات أكبر من الوقود المستنفد. ولكن يجب أن نتذكر أنه مقابل هذه الفوائد المحتملة، فإن هناك قضايا السلامة المرتبطة بنقل النفايات إلى موقع التخزين المؤقت في البداية ومنه إلى مستودع التخلص النهائي لاحقاً.

ويمكن تنفيذ هذه الاستراتيجية بطرائق مختلفة، ومن حيث المبدأ، يمكن تنفيذها ضمن نطاق قانون سياسة النفايات النووية. ولكن هذا سيكون صعباً بسبب القيود التي تفرضها التعديلات على هذا القانون في عام 1987. وتحديداً فإن بناء منشأة للتخزين المركزي المؤقت (يسميها قانون سياسة النفايات النووية منشأة تخزين مُراقب قابل للاسترجاع) لا يمكن أن يبدأ إلا بعد ترخيص مستودع جيولوجي دائم، والخيار الوحيد لذلك المستودع هو جبل يوكا، وسعة التخزين لا يجوز أن تزيد على 10,000 طن معدن ثقيل إلى أن يبدأ المستودع بتسلم الوقود المستنفد (وبعدها تزيد السعة إلى 15,000 طن معدن ثقيل).

وفي سياق الوضع الحالي، فإن الصعوبة الكبرى التي تواجه تنفيذ الاستراتيجية بهذه الطريقة هي أنها تلغي إحدى الميزات الرئيسية للاستراتيجية؛ أي القدرة على الوفاء بعقود التخلص من الوقود المستنفد والتشجيع على بناء محطات طاقة نووية جديدة من دون الحاجة إلى انتظار المستودع الجيولوجي الدائم؛ فمعظم المخاوف بشأن العقود سيتلاشى حالما يتم ترخيص مستودع. ومن الصعوبات الأخرى الحد المفروض على السعة. فحتى لو ألغي شرط ترخيص مستودع، فسيبقى هذا الحد الذي يعني أنه لا يمكن نقل ملكية الجزء الأكبر من الوقود المستنفد إلى الحكومة الفيدرالية، برغم أنه مرتفع بما يكفي للسماح بنقل الوقود المستنفد من محطات الطاقة النووية المغلقة حالياً.

وبدلاً من ذلك، فإن تعديل قانون سياسة النفايات النووية بعدد من الطرائق، سيوفر مزيداً من المرونة في تطبيق هذه الاستراتيجية. وأحد التغييرات المهمة هو السماح ببناء منشأة واحدة أو أكثر للتخزين المركزي المؤقت قبل استكمال المستودع الجيولوجي الدائم. فهذا سيسمح للحكومة الفيدرالية بتسلم الوقود المستنفد بينما يجري التداول بشأن مستقبل جبل يوكا أو ريثما يعثر على مستودع جيولوجي دائم جديد. وقد أيدت لجنة مراجعة التخزين المراقب القابل للاسترجاع هذا التوجه (Monitored Retrievable Storage Review Commission, 1989) وسعت وزارة الطاقة إلى تطبيقه دون جدوى خلال الثمانينيات والتسعينيات. ونظراً إلى ضآلة فرص نجاح مشروع جبل يوكا في المستقبل القريب، فقد يكون من المناسب إعادة النظر فيه الآن. التغيير الثاني الذي ربما يكون مفيداً

هو زيادة الحد الأقصى لسعة التخزين المركزي المؤقت. وفي هذه الحالة، يمكن نقل كامل الوقود المستنفد من محطات الطاقة النووية بسرعة نسبياً. وأخيراً، فإن تعديل قانون سياسة النفايات النووية، بحيث يسمح بالتخلص الجيولوجي الدائم خارج ولاية نيفادا سيتيح فرصة للنظر في مواقع بديلة للمستودعات الجيولوجية الدائمة. وعلى حين أن هذا قد يؤخر ترخيص مستودع جيولوجي دائم، فإن تنفيذ التخزين المركزي المؤقت سيخفف الكثير من الاستعجال للمضي قدماً في إقامة مستودع جيولوجي دائم.

الحجة المضادة لهذه الاستراتيجية، التي أشرنا إليها في القسم السابق، هي أن المعارضة للتخزين المؤقت تنبع من خشية أن يمتد التخزين المؤقت إلى أجل غير مسمى في حال عدم وجود خطة للتخلص الدائم. وبرغم المحاولات الكثيرة، فقد فشلت مراراً الجهود السابقة لإنشاء مرافق فيدرالية وخاصة للتخزين المركزي المؤقت. ومع ذلك، يمكن القول بأن بيئة السياسة قد تغيرت نتيجة للحاجة إلى تخفيض الانبعاثات العالمية من غازات الاحتباس الحراري، وهذا التغيير كافٍ ليقتضي إعادة النظر في هذا الخيار.

الأولويات التي تدعم هذه الاستراتيجية مماثلة للأولويات التي تدعم المضي قدماً في مشروع جبل يوكا. فهذه الاستراتيجية تفسح المجال لتنفيذ الالتزام التعاقدي للحكومة الفيدرالية بتسلم النفايات بأسرع وقت ممكن، وهذا سيزيل عقبة رئيسية أمام التوسع في الطاقة النووية. ولكن التخلص النهائي من الوقود المستنفد في مستودع جيولوجي دائم سيستغرق وقتاً أطول؛ ما يعني تأخير الحل النهائي لمشكلة إدارة الوقود المستنفد. وبما أن هذا الخيار يسمح بالنظر في مواقع متعددة وبحدوث تقدم تكنولوجي في مجال التخلص الجيولوجي خلال العقود القليلة القادمة، فهو أفضل قليلاً، وإن كان مماثلاً في الأساس، من حيث السلامة والأمن والجدوى التقنية.

هناك بعض النواحي الأخرى المتعلقة بالسياسة التي يجب أخذها في الحسبان إذا استمر النظر إلى جبل يوكا على أنه حل غير قابل للتطبيق مع عدم تجديد عملية اختيار موقع للمستودع الجيولوجي الدائم ودراسته والموافقة عليه. فبالنظر إلى مدى تجاهل قانون سياسة النفايات النووية للوقت اللازم لتحديد موقع للمستودع الجيولوجي الدائم وبنائه،

قد يكون من الحكمة الابتعاد عن النهج القائم على الجدول الزمني واعتماد النهج التدريجي الذي اقترحه المجلس الوطني للبحوث (National Research Council, 2003). أما بالنسبة إلى البديل من جبل يوكا، فإن إنشاء مؤسسة جديدة لإدارة اختيار الموقع وتطوير مواقع للتخزين المركزي ومستودعات جيولوجية دائمة معاً قد يساعد في استعادة ثقة الرأي العام في هذا المشروع. وبالإضافة إلى نقل جزء كبير من المسؤوليات السابقة لمكتب إدارة النفايات المشعة الناتجة من النشاطات المدنية التابع لوزارة الطاقة إلى مؤسسة جديدة، يمكن إعادة النظر في أدوار الجهات الأخرى، بما في ذلك وكالة حماية البيئة وهيئة تنظيم الطاقة النووية والأكاديمية الوطنية للعلوم والصناعة، ومراجعتها إذا اعتُبر من المفيد تعديلها. وقد يكون من المفيد أيضاً، لأسباب تتعلق بالتقنية وقبول الرأي العام، العودة إلى فكرة التقويم والبناء لمواقع عدة، كما نص على ذلك أصلاً، قانون سياسة النفايات النووية. فمن الناحية التقنية، سيسمح هذا باستمرار دراسة بيئات جيولوجية بديلة؛ مثل: تشكيلات الجرانيت والصخر الزيتي والملح والصلصال التي تعكف بلدان أخرى على دراستها بشكل جدي (IAEA, 2001; National Research Council, 2001). ومن منظور القبول العام والسياسي، فإن الدراسة لبناء مواقع متعددة، قد تخفف من الشعور بالظلم الذي نشأ عندما حصر الكونغرس الاختيار بولاية نيفادا.

السعي لتنفيذ دورات الوقود المتقدمة

في هذه الاستراتيجية، يتم تركيز الموارد على تطوير دورة وقود نووي متقدمة من شأنها أن تسمح بإعادة تدوير الوقود النووي المستنفد. وماتزال تكنولوجيات دورة الوقود المتقدمة التي تتيح خفضاً كبيراً في حجم نفايات الوقود المستنفد في مراحل البحث والتطوير. وسنحتاج إلى وقت كبير واستثمارات فيدرالية لتنفيذ هذه الاستراتيجية، وخاصة إذا كان الهدف من الدورة المتقدمة هو خفض تركيز عناصر ما بعد اليورانيوم في الوقود المستنفد بنسب كبيرة. وهذا البديل قبل كل شيء، يستلزم زيادة كبيرة في جهود البحث والتطوير لتحديد الجدوى التقنية والقاعدة التكنولوجية اللازمة لتطوير النظم الفرعية والمكونات الرئيسية في العملية. وسيتبع ذلك إنفاق مليارات الدولارات لاختيار

دورة الوقود وعرضها على نطاق تجاري. وبعدها يلزم تطوير بنية تحتية جديدة كبيرة، بما في ذلك محطات لإعادة معالجة الوقود المستنفد، ومنشآت جديدة لتخصيب اليورانيوم وصنع الوقود، وأسطول جديد من المفاعلات المتقدمة. وسيبقى هناك حاجة إلى مستودع جيولوجي دائم من أجل ما تبقى من النفايات العالية الإشعاع والنفايات المعمرة ذات الإشعاع المنخفض والإشعاع المتوسط، برغم إمكانية تأجيل جهود تحديد موقع المستودع والموافقة عليه طوال عقود؛ ونظراً إلى المدة الطويلة اللازمة للتطوير والتنفيذ للبنية التحتية لدورة الوقود المتقدمة، فمن المرجح أن يستمر التخزين السطحي للوقود المستنفد لمدة تزيد بعقود على أي بديل من بدائل التخلص المباشر التي سبقت مناقشتها.

تختلف الآثار المترتبة على اختيار دورة الوقود المتقدمة اختلافاً كبيراً عن البدائل الأخرى. فالعوائق التقنية كبيرة، والتكلفة عالية، وقبول الرأي العام يرجح أن يكون ضعيفاً بسبب الحاجة إلى بناء مرافق إضافية للمعالجة. ونظراً إلى التحديات التقنية، فإن هناك شكوكاً كبيرة حول احتمال نجاح هذا البديل وسلامته وأمنه؛ وهذا يعني أنه قد يترك للأجيال القادمة حلاً غير مقبول أو غير قابل للتطبيق. كما أنه يترك للأجيال القادمة مهمة تحديد موقع لمستودع جيولوجي دائم وقرار بنائه، بما في ذلك مخاوف القبول العام والسياسي المرتبطة بتلك العملية. ومن شأن دورة الوقود المتقدمة تخفيض الطلب على موارد اليورانيوم الخام، ومقدار هذا التخفيض يعتمد بقوة على تصميم دورة الوقود المختارة، وقد يتراوح ما بين النصف وأكثر من 90٪، وهذا مهم في حالة ارتفاع أسعار اليورانيوم بشكل كبير. وإذا كانت الاستراتيجية المختارة تتضمن تخزين النفايات العالية الإشعاع المعزولة وتبريدها لمدة تتراوح من 100 إلى 200 من السنوات، فإن دورة الوقود المتقدمة التي تقلل كثيراً كميات الأكتينيدات في النفايات قد تخفض أيضاً السعة اللازمة للمستودع الجيولوجي الدائم بنسبة تتراوح بين 90٪ و95٪ بالمقارنة إلى التخلص من الوقود المستنفد بشكل مباشر. ولكن هذا التخفيض في السعة اللازمة سيضيع جزء منه بسبب ما يصاحب ذلك من زيادة في النفايات المعمرة ذات الإشعاع المنخفض إلى المتوسط التي يلزم أيضاً التخلص منها في مستودع جيولوجي. وبرغم أن دورة الوقود المتقدمة

تخلصنا من عناصر ما بعد اليورانيوم المعمرة في النفايات، فليس لها فائدة تذكر، من حيث تخفيض جرعة الإشعاع الفعالة أو المدة اللازمة للتعرض لهذه الجرعة.

هذه الاختلافات تعني أن الظروف التي يفضل معها اختيار دورة الوقود المتقدمة مختلفة جداً عن الظروف التي يفضل معها اختيار التخلص المباشر. فنظراً إلى التأثير المحتمل لهذه الدورة في حجم النفايات واستهلاك اليورانيوم، تعد هي الخيار الأفضل إذا كانت الأولوية هي لتقليص حجم المستودع الجيولوجي الدائم وتمديد العمر الافتراضي لموارد اليورانيوم. وهذه الأولويات ستكون هي الأهم في حالة وجود دعم قوي لتوسع كبير في الطاقة النووية.

من المرجح أن يؤدي خيار دورة الوقود المتقدمة إلى تأجيل التخلص من الوقود المستنفد لفترة أطول من أي من الخيارين السابقين اللذين يركزان على التخلص الجيولوجي؛ ومن ثم، فإن هذه الاستراتيجية ستكون أكثر جاذبية إذا وجد حل سريع لمشكلة ملكية الوقود المستنفد بدلاً من تأجيله إلى حين تنفيذ دورة الوقود المتقدمة. وهناك تحديداً احتمال كبير بأن يلزم تنفيذ التخزين المركزي المؤقت قبل فترة طويلة من توافر إمكانية إعادة تدوير الوقود المستنفد.

هذا الخيار يختلف عن السياسة الحالية للولايات المتحدة بشكل يقتضي دون أدنى شك إجراء تغييرات في الإطار المؤسسي. فدورة الوقود المتقدمة ستؤدي إلى إيجاد أنواع جديدة من المرافق، وأنواع جديدة من النفايات، ومسؤوليات ومخاطر جديدة بالنسبة إلى العمال؛ ولذلك ستجب دراسة الإطار التنظيمي الحالي للصناعة النووية الذي يقوم على ترخيص المنشآت وحماية البيئة والأمن وسلامة العمال وصحتهم، دراسة متأنية لتقرير ما إذا كان مرناً وشاملاً بما يكفي لدعم عمليات دورة الوقود المتقدمة أو لا. وقد تساعد المشاركة في الموارد والمعرفة بين الهيئات التنظيمية الوطنية في البلدان المختلفة في تجنب الازدواجية في العمل وتعزيز أفضل الممارسات (NEA, 2009a). كما أن تطوير دورة الوقود المتقدمة وتشغيلها، يتطلبان دعماً حكومياً لجهود البحث والتطوير الجديدة والتعليم والتدريب وتطوير البنية التحتية. وتحقيق تقدم في بحوث دورة الوقود المتقدمة يتطلب

زيادة في التمويل وتنسيقاً قوياً بين البرامج، برغم أنه لن يكون من الضروري إجراء تغييرات كبيرة في هياكل المؤسسات أو أدوارها. وسيجب التوسع في جهود التعليم والتدريب لتغيير الأوضاع الناتجة من الجمود في برامج الطاقة النووية. وسوف يكون الدعم الحكومي القوي مهماً لبناء البنية التحتية الجديدة لدورة الوقود المتقدمة وتشغيلها. ويتطلب نجاح الانتقال إلى دورة الوقود المتقدمة، توزيعاً دقيقاً للمسؤوليات بين الصناعة والحكومة من خلال التصميم والتطبيق لأدوات السياسة العامة؛ مثل دعم البحث والتطوير واللوائح والإعفاءات الضريبية وتقديم القروض وإعانات التأمين.

استمرار التخزين في الموقع

في هذه الاستراتيجية يبقى الوقود المستنفد في مواقع محطات الطاقة النووية إلى أن يحدث ما يقتضي اتخاذ مزيد من الإجراءات. وهذا يساوي - من حيث الأساس - خيار "عدم اتخاذ أي إجراء"، وهو الذي درسته وزارة الطاقة سابقاً عندما أصدرت بيان الأثر البيئي لخيارات إدارة النفايات المشعة (DOE, 1980). وهو يختلف عن خيار التخزين الدائم، كالذي درسته وزارة الطاقة في بيان الأثر البيئي لمستودع جبل يوكا (DOE, 2008b)، في أن هناك فهماً لوجوب التخلص من الوقود المستنفد في مستودع جيولوجي دائم في نهاية المطاف. وفي هذه الاستراتيجية التي تقوم على "الانتظار والترقب"، تختار الولايات المتحدة تأجيل القرارات والاستثمارات المتعلقة بزيادة نشاطات إدارة الوقود المستنفد إلى أن تقع أحداث خارجية تستدعي زيادة تلك النشاطات. وقد تتضمن تلك الأحداث إحراز تقدم كبير في إدارة الوقود المستنفد في بلد آخر، أو تزايد الحاجة إلى بناء محطات جديدة للطاقة النووية بسبب تفكيك محطات الطاقة النووية القائمة، أو زيادة كبيرة في أسعار اليورانيوم الخام تحفز الطلب على إعادة تدوير الوقود المستنفد.

يشير استعراضنا للأدبيات إلى أن استمرار التخزين في الموقع خيار سليم وآمن، وهو الأقل تكلفة، ويواجه عقبات تقنية قليلة، وأقل قدر من مصاعب القبول العام والسياسي. ولما يتوافر حتى الآن، حل لموضوع إعادة تغليف الوقود المخزن، ولكن هذا ليس تحدياً تقنياً مهماً. وفي معظم الحالات، لا يوجد ضيق في المساحة أو أي سبب مُلِحّ

آخر لنقل الوقود المستنفد من مواقع محطات الطاقة النووية. كما أن استمرار التخزين في الموقع سيتيح الوقت لمواصلة تطوير تكنولوجيات التخلص الجيولوجي الدائم ودورات الوقود المتقدمة.

هذه العوامل الجذابة على المدى القصير يجب موازنتها مع التحديات الكبيرة التي تواجه هذا الخيار على المدى الطويل؛ حيث ستبقى الحكومة الفيدرالية في حالة إخلال بعقود التخلص من الوقود المستنفد وسيستمر تراكم الالتزامات المالية عليها لتعويض محطات الطاقة النووية التي كان يفترض أن تستطيع تسليم الوقود المستنفد إلى الحكومة الفيدرالية في عام 1998. وقد بلغت هذه الالتزامات حتى الآن عشرات المليارات من الدولارات (Garvey, 2009). وعدم القيام بأي شيء لمعالجة مسألة نقل ملكية الوقود المستنفد إلى الحكومة الفيدرالية يعني أن هذه الاستراتيجية لن تحقق أي تقدم نحو توسيع دور الطاقة النووية وقد ترسل رسالة سلبية إلى شركات توليد الكهرباء حول الآفاق المستقبلية وتزيد من الشكوك المحيطة بمحاولة ترخيص مفاعلات جديدة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن هذه الاستراتيجية ستترك أعباء كبيرة للجيل القادم. والشكوك الحالية في شأن أفضل السبل لإدارة الوقود المستنفد، بما في ذلك تحديد موقع للمستودع الجيولوجي الدائم، وبناؤه، ستستمر وستحتاج إلى حل في المستقبل؛ ولذلك فإن اختيار هذه الاستراتيجية سيشكل مخالفة للمبدأ القائل بأن الجيل الذي يستفيد من النشاطات التي تنتج النفايات النووية يجب أن يتحمل أعباء إدارة تلك النفايات، والذي كانت سياسة إدارة الوقود النووي المستنفد تقوم عليه حتى الآن.

سيكون هذا الخيار هو الأفضل في الظروف التي تعد فيها الشكوك المتعلقة بالجدوى التقنية أو المخاطر البيئية أو السلامة أو الأمن أو قبول الرأي العام أو التكلفة لأي بديل آخر كبيرة جداً بالمقارنة إلى التخزين في الموقع ولا تسمح بالمضي قدماً فيه. وهذه الظروف تعني ضمناً أنه بدلاً من أن تكون الولايات المتحدة ملتزمة أخلاقياً بعدم ترك مهمة التخلص من الوقود المستنفد للأجيال القادمة، فهي مازالت غير مستعدة لاتخاذ أي إجراء في هذه المسألة والانتظار هو الخيار الأفضل.

وقد سبق النظر في استراتيجيات مشابهة لهذه ورُفضت مرات عدة، بما في ذلك بيان الأثر البيئي الصادر من وزارة الطاقة بشأن الخيارات المتاحة لإدارة النفايات المشعة والقرارات اللاحقة له (DOE, 1980, 1981)، وتوصية مجلس الشيوخ بالموافقة على موقع جبل يوكا (U.S. Senate, 2002)، وبيان الأثر البيئي الصادر من وزارة الطاقة بشأن مستودع جبل يوكا (DOE, 2008b).

الانعكاسات المترتبة على سياسة إدارة الوقود المستنفد

توضح المناقشة السابقة أن للاستراتيجيات المختلفة آثاراً متباينة بشكل كبير، من حيث الأولويات المجتمعية لإدارة الوقود النووي المستنفد وتقاسم المسؤوليات بين الأجيال الحالية والأجيال القادمة والنمو المستقبلي للطاقة النووية. وللمساعدة في المقارنة بين البدائل المختلفة، لخصنا هذه الآثار في الجدولين (4-2) و(4-4).

الجدول (4-2)

الأولويات التي ترجح كفة الاستراتيجيات المختلفة

الاستراتيجية	الأولويات التي تتماشى مع الاستراتيجية
تسريع العمل على مستودع جبل يوكا	- توفير حل لمسألة التخلص من الوقود المستنفد في أسرع وقت ممكن - الوفاء بعقود التخلص من الوقود المستنفد وتمكين التوسع في الطاقة النووية
تطوير التخزين المركزي المؤقت إلى جانب التخلص الجيولوجي الدائم	- الوفاء بعقود التخلص من الوقود المستنفد وتمكين التوسع في الطاقة النووية - زيادة الثقة في التوافق على قرار المستودع وأدائه
السعي لتنفيذ دورات الوقود المتقدمة	- دعم قوي لتوسع كبير في الطاقة النووية - تقليص حجم المستودع الجيولوجي الدائم وتمديد عمر موارد اليورانيوم
الاستمرار في التخزين في الموقع	شكوك كبيرة جداً في جميع البدائل الأخرى بشكل لا يسمح بالمضي قدماً في هذه المرحلة

ثمة اختلافات مهمة بين الأولويات التي ترجح كفة كل استراتيجية؛ ولذلك فإن تحديد السياسة الاستراتيجية الملائمة يتطلب النظر في أهداف البلاد من إدارة الوقود المستنفد ورؤيتها لتوليد الطاقة النووية. وكما يبين الجدول (4-2)، إذا كانت الأولوية هي

للرأي القائل إن علينا توفير حل للتخلص من الوقود المستنفد في أسرع وقت ممكن، إما لأننا نؤمن أن الجيل الذي يستفيد من النشاطات التي تنتج النفايات النووية يجب أن يتحمل أعباء التخلص من تلك النفايات، أو لأننا بحاجة إلى التأكد من جدوى دورة الوقود بكاملها، قبل المضي في تطوير الطاقة النووية بشكل تجاري، فإن المضي في خيار مستودع جبل يوكا هو الخيار الأمثل. فهذه الاستراتيجية تسمح بتحقيق التزام الحكومة الفيدرالية بتسلم الوقود المستنفد وتمهد الطريق للتوسع في الطاقة النووية. وإذا كانت الأولوية هي للسماح بالتوسع في استخدام الطاقة النووية مع التركيز على الثقة في عملية صنع القرار المرتبط بتطوير المستودعات وأدائها، فستكون الاستراتيجية التدريجية التي تجمع ما بين التخزين المركزي المؤقت وتحديد موقع لمستودع جيولوجي دائم جديد أكثر جاذبية. وإذا كان هناك دعم قوي لتحقيق زيادة كبيرة جداً في الطاقة النووية؛ ما يعني في نهاية المطاف التركيز على سعة المستودع الجيولوجي الدائم وموارد اليورانيوم، فالخيار الأفضل هو إعادة تدوير الوقود المستنفد من خلال دورة وقود متقدمة. وأخيراً، إذا كان هناك شعور سائد بعدم اليقين بالنسبة إلى أداء المستودع أو السلامة العامة أو الأمن (في أثناء النقل مثلاً) أو التكلفة والقبول العام والسياسي للطاقة النووية، فقد يكون استمرار التخزين في الموقع هو الخيار المناسب.

عند النظر إلى الآثار في الأجيال المستقبلية (الجدول 4-3)، فإن أحد الاختلافات الواضحة هو أن الاستراتيجيات المختلفة تصل إلى مراحل مختلفة، من حيث التقدم نحو التخلص النهائي من الوقود المستنفد. فالمضي قدماً في مشروع جبل يوكا أو استراتيجية التخزين المؤقت مع الانتقال تدريجياً إلى التخلص الجيولوجي الدائم يوفر حلاً للتخلص النهائي في المدى القريب نسبياً. أما العمل على تطبيق دورات الوقود المتقدمة فسيقلل من حاجة الأجيال القادمة إلى مستودعات تخزين ذات طاقة استيعابية كبيرة، بحسب تفصيلات التكنولوجيا المختارة. ولكن هناك حاجة إلى استثمارات كبيرة لتحقيق تلك الفوائد، كما يجب تحديد مواقع لمنشآت إعادة المعالجة وإعادة التدوير ذاتها ثم تشغيلها لفترة زمنية طويلة جداً، وربما يلزم أيضاً التخلص من منتجات النفايات الأخرى الناتجة من تلك العمليات. وأخيراً فإن استمرار التخزين في الموقع يترك عبء التخلص من تلك النفايات للأجيال القادمة.

وثمة اختلاف آخر يتعلق بمستوى عدم اليقين الذي نتركه للأجيال القادمة. فاستراتيجية جبل يوكا والجمع ما بين التخزين المركزي والتخلص الدائم يتركان أقل قدر من عدم اليقين. والسعي لتطبيق خيار دورة الوقود المتقدمة سيوفر للأجيال القادمة مزيداً من المعلومات عن جدوى هذا الأسلوب والسلامة والأمن الذين يوفرهما. ولكن إذا تم هذا على حساب جهود التخزين المركزي أو المستودع الدائم، فستكون لدى الأجيال القادمة معلومات أقل مما يلزم لتطبيق هذه الحلول التقليدية الأكثر رجحاناً. وأيضاً، نظراً إلى اختلاف المناهج والأهداف المحتملة لتكنولوجيات دورة الوقود المتقدمة، يجب أن تضع سياسة الحكومة الخاصة باختيار المناهج المحتملة أهدافاً واضحة فيما يتعلق بالنفايات لكي تحقق هذه الاستراتيجية في نهاية المطاف فوائد كبيرة، من حيث تقليص السعة اللازمة للمستودع. فمواصلة التخزين السطحي تطيل حالة عدم اليقين الحالية بشأن أفضل السبل لإدارة الوقود النووي المستنفد.

الجدول (4-3)

انعكاسات الاستراتيجيات المختلفة على الأجيال القادمة

الاستراتيجية	الانعكاسات بالنسبة إلى الأجيال القادمة
تسريع العمل على مستودع جبل يوكا	- حل للتخلص من الوقود المستنفد المخزن في مواقع المحطات النووية - التقيد بالتكنولوجيا الحالية - عدم إمكانية استرجاع الموارد المدفونة بعد إغلاق المستودع
تطوير التخزين المركزي المؤقت إلى جانب التخلص الجيولوجي الدائم	- حل للتخلص من الوقود المستنفد المخزن في مواقع المحطات النووية - عدم إمكانية استرجاع الموارد المدفونة بعد إغلاق المستودع
السعي لتنفيذ دورات الوقود المتقدمة	- احتمال تخفيض الطلب على سعة المستودع وموارد اليورانيوم - عدم اليقين بشأن احتمالات النجاح والسلامة والأمن - وجوب المحافظة على مرافق التخزين في الموقع لمدد طويلة أو بناء منشأة للتخزين المركزي المؤقت - وجوب تحديد موقع لمستودع جيولوجي دائم وتطويره
الاستمرار في التخزين في الموقع	- وجوب المحافظة على مرافق التخزين في الموقع لمدد طويلة حتى في حالة تفكيك المحطات - وجوب تحديد موقع لمستودع جيولوجي دائم وتطويره

هناك أيضاً انعكاسات مختلفة على إمدادات الوقود في المستقبل، برغم أنها ربما تكون أقل أهمية. فاستخدام مستودع جيولوجي دائم للتخلص من الوقود المستنفد على المدى القريب سيحول دون استرجاع الوقود المستنفد إذا أصبح من المفضل إعادة تدويره. وبالمقابل، فإن وجود دورة الوقود المتقدمة يخفض الطلب على اليورانيوم؛ ونظراً إلى عدم اليقين بشأن حجم إنتاج الطاقة النووية في المستقبل، فمن الصعب تقويم هذه الآثار في إمدادات الوقود. والأنماط التاريخية للاكتشافات المتواصلة وتناقص التكاليف في إنتاج اليورانيوم الخام تشير إلى أن المحافظة على الوقود ربما لا يكون اعتباراً مهماً.

الجدول (4-4)

انعكاسات الاستراتيجيات المختلفة على النمو المستقبلي للطاقة النووية

الاستراتيجية	الانعكاسات على نمو الطاقة النووية
تسريع العمل على مستودع جبل يوكا	يظهر قدرة الحكومة على تسلم الوقود المستنفد ويمهد الطريق لنمو الطاقة النووية في المدى القريب
تطوير التخزين المركزي المؤقت إلى جانب التخلص الجيولوجي الدائم	يظهر قدرة الحكومة على تسلم الوقود المستنفد ويمهد الطريق لنمو الطاقة النووية في المدى القريب
السعي لتنفيذ دورات الوقود المتقدمة	غير واضح، ربما يؤدي في نهاية المطاف الطريق إلى نمو الطاقة النووية إذا ما تحسنت شروط استمرار التخزين وألغت الولايات تعليق بناء المحطات الجديدة
الاستمرار في التخزين في الموقع	لا يسهل نمو الطاقة النووية، وربما يكون لها تأثير سلبي

ولا يتأثر النمو المستقبلي للطاقة النووية بإدارة الوقود المستنفد فحسب، بل يتأثر أيضاً بتكلفة محطات الطاقة النووية ومخاطرها وإمكانية التأمين عليها وقبول الرأي العام لها. ولذلك، لا يمكن عزل تأثيرات الاستراتيجيات المختلفة لإدارة الوقود المستنفد في نمو الطاقة النووية في الولايات المتحدة (الجدول 4-4)، بل يجب تفسيرها في ضوء التأثيرات الأخرى. وسيكون لتسريع عملية ترخيص مستودع في جبل يوكا واستراتيجيات التخزين المؤقت مع الانتقال تدريجياً إلى التخلص الجيولوجي الدائم أثر إيجابي كبير في مستقبل الطاقة النووية؛ لأنها ستسمح بسرعة للحكومة الفيدرالية بتحقيق التزامها التعاقدي بتسلم الوقود النووي المستنفد. وهذا من شأنه إزالة العقبات التي تعترض النمو

بسبب المخاوف المتعلقة بالوقود المستنفد. ويمكن استراتيجية دورة الوقود المتقدمة أن تساعد على تمهيد الطريق لتطوير محطة جديدة للطاقة النووية إذا كانت تتضمن آليات لتحسين شروط الملكية وتمويل استمرار التخزين السطحي للوقود المستنفد. وأخيراً فإن استمرار عدم الحسم بشأن سياسة إدارة الوقود المستنفد واحتمال تعقيد ترخيص المفاعلات الجديدة واستمرار التخزين في الموقع، أمور تعني عدم فعل شيء لتسهيل نمو الطاقة النووية وقد يكون لذلك أثر سلبي.

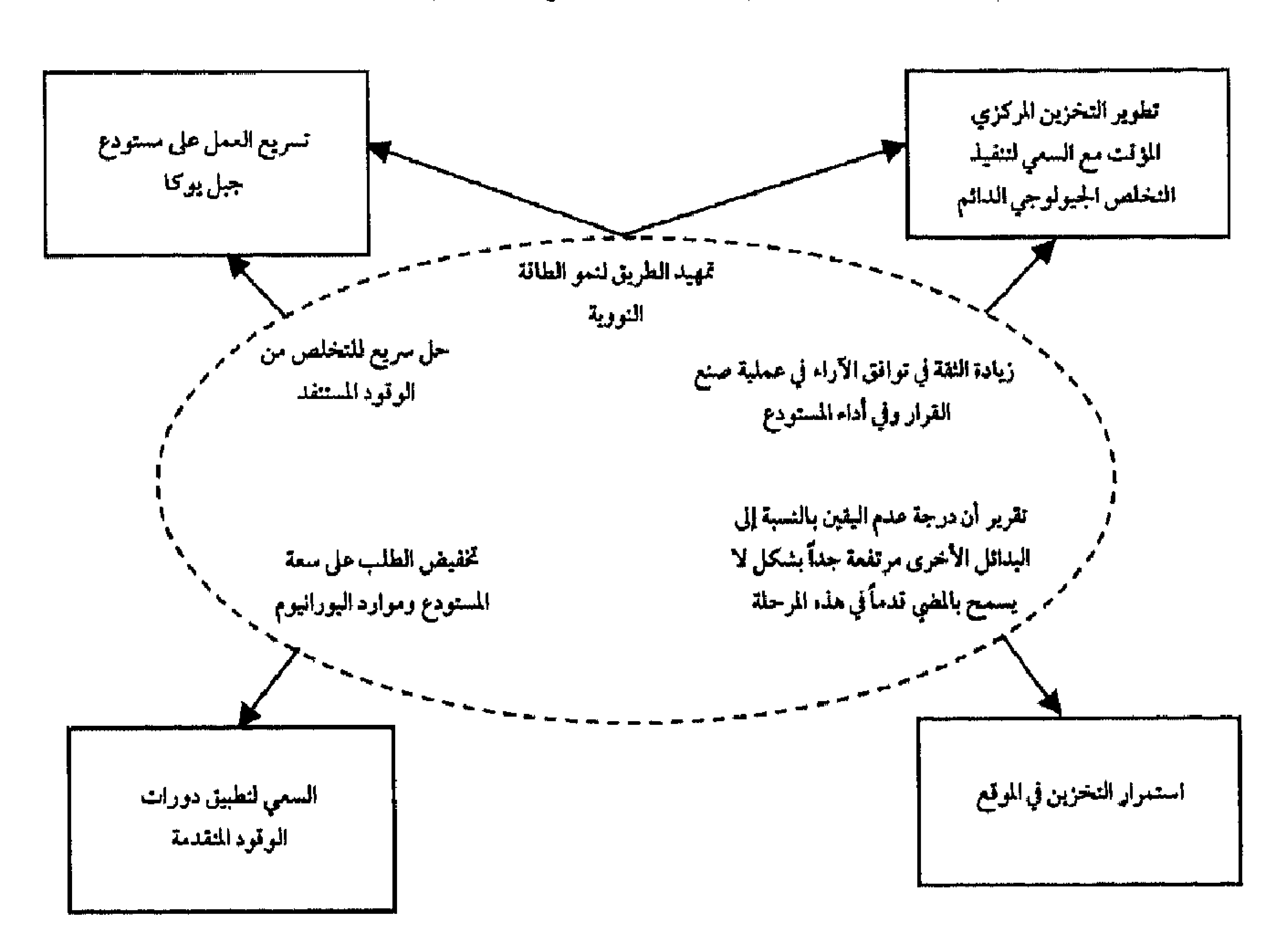
يلخص الجدولان (4-2) و(4-4) الانعكاسات المهمة للاستراتيجيات الأربع التي درسناها في هذه الدراسة على السياسات. وعلى حين يمكن وضع استراتيجيات أخرى من خلال الخوض في المزيد من التفصيلات حول الأساليب التقنية وأشكال الجمع بينها، فإن القصد من الاستراتيجيات المختارة هو أن تشمل معظم الخيارات التي يجري النظر فيها حالياً. واختيار السياسة البديلة يعتمد في المقام الأول على التفضيلات المجتمعية بشأن التخلص من الوقود المستنفد ونمو الطاقة النووية وتقاسم المسؤوليات بين الأجيال.

وعلى حين لا تميز النتائج بين الاستراتيجيات المختلفة وفقاً لتفضيلات مجتمعية فريدة، فسوف نجد أن بعض الأولويات تتوافق واستراتيجيات عدة، وبعضها يتوافق وأولويات عدة، ولكنها تساعد في تقييد نطاق الاستراتيجيات المركبة. ويظهر الشكل (4-1) الترابط بين الاستراتيجيات والأولويات المحتملة. فالسعي لتطبيق دورات الوقود المتقدمة هو خيار جذاب بشكل رئيسي إذا كانت القيود على سعة المستودع أو موارد اليورانيوم مهمة. والاستمرار في التخزين في الموقع هو خيار جذاب فقط إذا عدّت جميع الخيارات الأخرى غير مقبولة. والمضي قدماً في العمل على مشروع جبل يوكا أو استراتيجيات التخزين المركزي مع الانتقال تدريجياً إلى التخلص الجيولوجي الدائم هو الخيار الأكثر جاذبية عندما تكون الأولويات هي تسهيل نمو الطاقة النووية وعدم ترك مهمة التخلص من الوقود المستنفد للأجيال القادمة. والاختيار بين هذه الخيارات يعتمد على أهمية زيادة الثقة في التوافق على قرار وفي أداء المستودع الجيولوجي الدائم.

هذا التحليل يسلط الضوء على الآثار المترتبة على كل استراتيجية في سياق هذه التفضيلات المجتمعية. لذلك فإن اختيار الاستراتيجية يستلزم تقويم هذه التفضيلات بين أصحاب المصالح، فقد يصعب الوصول إلى توافق كامل. ومن المرجح عدم وجود استراتيجية واحدة ترضي جميع أصحاب المصالح في جميع الأبعاد الثلاثة المبينة في الجدولين (4-2) و(4-4). ولكننا جمعنا الاعتبارات التقنية والمؤسسية الكثيرة على شكل مجموعة محدودة من التفضيلات أملاً في أن يسهم هذا التحليل في بناء توافق في الآراء والمساعدة في توجيه عملية صنع القرار.

الشكل (4-1)

الترابط بين الاستراتيجيات والأولويات المجتمعية المحتملة



الهوامش

هوامش الفصل الأول

1. Pub. L. 97-425, Pub. L. 100-202, and Pub. L. 100-203.

2. تشمل وحدة القياس "طن معدن ثقيل"، وزن اليورانيوم والبلوتونيوم؛ بوصفهما عنصرين ثقيين في الوقود المستنفد. وهي لا تشمل العناصر الكيميائية الأخرى في قضبان الوقود والمواد التي صنعت منها تلك القضبان.

3. النفايات العالية الإشعاع هي المنتجات الجانبية العالية الإشعاع التي تنتج من إعادة معالجة الوقود النووي المستنفد.

4. لم تكن معارضة مشروع المستودع شاملة في نيفادا؛ ولأخذ فكرة عن مدى التعقيد والتشابك في الآراء في الولاية، انظر Blue Ribbon Commission 2010.

هوامش الفصل الثاني

1. بينما يستمر تجديد براميل التخزين مدة تصل إلى 40 سنة، فإن شهادات براميل النقل، تصلح – حالياً – لمدة خمس سنوات فقط؛ ولذلك، فقد يلزم وجوب إعادة تغليف البراميل؛ للوفاء بمتطلبات النقل في المستقبل.

2. تشير التقديرات، إلى أنه إذا تخلفت وزارة الطاقة عن تسلم النفايات؛ وفقاً لعقودها المبرمة مع الشركات المشغلة للمفاعلات، فستراكم على الحكومة التزامات تزيد بمقدار 500 دولار سنوياً، على حجم الالتزامات التي ستكون قد ترتبت عليها حتى ذلك الحين، وهي التي تقدر بمبلغ 12 مليار دولار (GAO, 2009; Holt, 2010). وهذه الالتزامات قد تتأثر بشكل كبير بالدعاوى الحالية وبالإجراءات التشريعية التي يقوم بها الكونغرس؛ لتعديل قانون سياسة النفايات النووية (GAO, 2009).

3. قدر ماكفارلين (Macfarlane, 2001)، أن التكاليف الرأسمالية الأولية لبناء منشأة تخزين جاف، تقارب 9 ملايين دولار لكل موقع، بحسب قيمة الدولار عام 1998، أو ما يقارب من 15.4 مليون دولار للموقع الواحد، بحسب قيمة الدولار عام 2009، إذا أخذنا في الحسبان نسبة التضخم في قطاع الكهرباء بشكل عام، أما مكتب المحاسبة الحكومي الأمريكي (GAO, 2009)، فيشير إلى أن التكاليف ستكون أعلى، بحدود 30 مليون دولار في المتوسط للمفاعل الواحد، بحسب قيمة الدولار عام 2009. وقد تُكبد كثير من المفاعلات النووية الحالية هذه التكاليف، بشكل فعلي؛ لاستيعاب التخزين الجاف في الموقع.

4. بالنسبة إلى المفاعلات العاملة، تقدر تكاليف التشغيل والصيانة بما بين 470,000 دولار و750,000 دولار سنوياً للموقع، بحسب قيمة الدولار عام 1998، أو ما بين 800,000 دولار و1.3 مليون دولار للموقع الواحد، بحسب قيمة الدولار عام 2009.، أما بالنسبة إلى المفاعلات المفككة، فقد زادت تكاليف التشغيل والصيانة إلى ما بين 4 ملايين دولار و9 ملايين دولار سنوياً للموقع الواحد، بحسب قيمة الدولار عام 1998 (Macfarlane, 2001)، أو ما بين 7 ملايين دولار و15 مليون دولار سنوياً للموقع الواحد، بحسب قيمة الدولار عام 2009. واستناداً إلى المقابلات التي أجريت مؤخراً مع خبراء في هذه الصناعة، يشير مكتب المحاسبة الحكومي الأمريكي (GAO, 2009)، إلى أن استمرار تخزين النفايات النووية في مواقع المفاعلات المفككة، قد يكلف شركات الطاقة ما بين 4 ملايين دولار و8 ملايين دولار سنوياً.

5. استخدم مكتب المحاسبة الحكومي الأمريكي، محاكاة مونتي كارلو؛ للوصول إلى المجال الذي ستتراوح ضمنه تقديرات التكلفة. وقد تُرِك كثير من الافتراضات الرئيسية، بما في ذلك: أسعار الخصم المطبقة عبر فترات زمنية مستقبلية مختلفة. وافتراضات التكلفة، تتراوح وفقاً لتوزيعات محددة مسبقاً؛ ولمناقشة هذه الافتراضات، انظر الملحق الرابع من تقرير مكتب المحاسبة الحكومي الأمريكي (Appendix IV of GAO, 2009).

6. يمكن بدلاً من ذلك، أن تفي وزارة الطاقة بالتزاماتها عن طريق استئجار مساحة في منشأة خاصة.

7. يشير التقرير الأصلي إلى الكميات في حاشية سفلية كما يأتي: يحدد هذا التقرير نوعين من برامج النقل بشكل عام: برامج شحن الكميات الصغيرة وبرامج شحن الكميات الكبيرة. وعلى حين لا يوجد حد فاصل واضح بين هذين النوعين من البرامج، فإن الأول منهما يشمل شحن عشرات الأطنان من الوقود المستنفد، أو النفايات العالية الإشعاع، بينما يشمل الثاني شحن ما بين مئات وآلاف من الأطنان.

8. ذكرت الأكاديمية الوطنية للعلوم ما يأتي: تعد الهجمات على شحنات الوقود المستنفد والنفايات العالية الإشعاع، مصدر قلق كبيراً للمجتمع، ولكن اللجنة لم تستطع إجراء دراسة معمقة لأمن النقل؛ بسبب القيود المفروضة على المعلومات. وتوصي اللجنة بإجراء دراسة مستقلة لأمن عملية نقل الوقود المستنفد والنفايات العالية الإشعاع، قبل البدء بشحن كميات كبيرة إلى مستودع فيدرالي، أو إلى منشأة تخزين مؤقت (National Research Council, 2006, p. 3).

9. اقترح الهنود الأمريكيون المقيمون في محمية "سكل فالي" "Skull Valley"؛ على سبيل المثال، بناء منشأة خاصة لتخزين الوقود في محميتهم في ولاية يوتا، ولكن الولاية عارضت ترخيص المنشأة وبناءها، بينما لم توافق وزارة الداخلية على نقل ملكية الأراضي اللازمة لبناء المنشأة وتشغيلها.

10. يحتوي اليورانيوم الخام الطبيعي، على نسبة 0.711٪ من اليورانيوم 235؛ ولإنتاج الوقود اللازم للمفاعلات، يتم تخصيب اليورانيوم 235 بنسبة تتراوح ما بين 3٪ و5٪. وينتج من عملية التخصيب، مخلفات يشار إليها باليورانيوم المنضب الذي يحتوي نسبة 0.3٪ من اليورانيوم 235 (MIT, 2003).

11. تقسم عناصر ما بعد اليورانيوم أحياناً إلى البلوتونيوم و"الأكتينيدات الثانوية" (النبتونيوم والأميريسيوم والكوريوم).

12. هذا الترتيب يشابه الترتيب 3a في الدراسة التي أصدرتها هيئة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (NEA, 2006).

13. النفايات المعمرة ذات الإشعاع المنخفض والإشعاع المتوسط، هي تصنيف دولي للنفايات، يعادل إلى حد بعيد، تصنيف نفايات ما بعد اليورانيوم المستخدم في الولايات المتحدة.

14. كان الإطار الدولي للتعاون في مجال الطاقة النووية، يسمى - سابقاً - الشراكة العالمية للطاقة النووية.

15. في وقت ذلك التحليل كانت أسعار اليورانيوم أقل من 50 دولاراً للكيلوغرام الواحد، وظلت سنوات عدة على حالها، من دون أن تظهر عليها أي مؤشرات زيادة، إلا أنها ارتفعت ارتفاعاً حاداً بعد ذلك، ووصلت إلى ذروتها عند 350 دولاراً للكيلوغرام عام 2007، ثم انخفضت بسرعة مرة أخرى؛ حتى وصلت إلى ما دون 125 دولاراً للكيلوغرام، ومازالت تنخفض، ولا يشير هذا الارتفاع في الأسعار بالضرورة إلى أي تغيير جوهري في أسعار اليورانيوم، أو توافره على المدى الطويل. وبشكل عام فإن أسعار المواد الخام الأولية، انخفضت مع مرور الوقت، على الرغم من زيادة الطلب؛ بفضل زيادة كفاءة تكنولوجيات استخراجها (MIT, 2003)؛ ومن المتوقع أن يؤدي اكتشاف موارد كبيرة لليورانيوم في ساسكاتشوان وغرب الولايات المتحدة في الفترة الأخيرة إلى إبقاء أسعار اليورانيوم منخفضة، طوال سنوات كثيرة قادمة. وقد كرر معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا هذه النتيجة عام 2010 (MIT, 2010).

16. بما أن التحليل نوعي، فليس هناك معنى لمقارنة التقويمات في صفوف مختلفة لكل بديل؛ أي ليس هناك مثلاً، معنى للحديث عن مخاطر سلامة "منخفضة" بالمقارنة إلى مخاطر أمنية "منخفضة".

هوامش الفصل الثالث

1. لم يُشرع في بناء محطات نووية جديدة منذ عام 1977 (EIA, 2009).

2. دعوى معهد الطاقة النووية ضد وكالة حماية البيئة: *Nuclear Energy Institute v. EPA*, 373 F.3d 1251 (D.C. Circuit 2004).

3. انظر:

U.S. Environmental Protection Agency, Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for Yucca Mountain, Nevada; Final Standard, 40 CFR Part 197, June 13, 2001, and later amended September 30, 2008;

للاطلاع على تاريخ عملية وضع المعيار، انظر أيضاً: مكتب المحاسبة الحكومي (GAO, 2000).

4. معهد الطاقة النووية ضد وكالة حماية البيئة: *Nuclear Energy Institute v. EPA*, 2004.

5. Nuclear Waste Project Office, 1998.

6. تجدر الإشارة إلى أن وكالة حماية البيئة مددت فترة الالتزام؛ لا لأنها كانت ترى ذلك مناسباً، بل لأن الأكاديمية الوطنية للعلوم أوصت بذلك.

المصادر والمراجع

Advisory Panel on Alternative Means of Financing and Managing Radioactive Waste Facilities, Managing Nuclear Waste—A Better Idea: A Report to the U.S. Secretary of Energy, Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, December 1984.

Behr, Peter, "Nuclear: Yucca Mountain Is Dead, Says Domenici," Climate Wire, December 2, 2009. As of October 11, 2010: http://www.eenews.net/public/climatewire/print/2009/12/02/2

Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, "Disposal Subcommittee," updated September 13, 2010. As of October 12, 2010: http://www.brc.gov/Disposal_Subcommittee.html

Bodansky, David, Nuclear Energy: Principles, Practices, and Prospects, Woodbury, N.Y.: American Institute of Physics, 1996.

Bunn, Matthew, Steve Fetter, John P. Holdren, and Bob van der Zwaan, The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel: Final Report 8/12/1999–7/30/2003, Cambridge, Mass.: Project on Managing the Atom, Belfer Center for Science and International Affairs, John F. Kennedy School of Government, Harvard University, DE-FG26-99FT-4028, December 2003. As of October 11, 2010: http://belfercenter.ksg.harvard.edu/publication/2089/economics_of_reprocessing_vs_direct_disposal_of_spent_nuclear_fuel.html

Bunn, Matthew, John P. Holdren, Allison Macfarlane, Susan E. Pickett, Atsuyuki Suzuki, Tatsujiro Suzuki, and Jennifer Weeks, Interim Storage of Spent Nuclear Fuel: A Safe, Flexible, and Cost-Effective Near-Term Approach to Spent Fuel Management, Cambridge, Mass.: Harvard University Project on Managing the Atom and University of Tokyo Project on Sociotechnics of Nuclear Energy, June 2001. As of October 11, 2010: http://belfercenter.ksg.harvard.edu/publication/2150/interim_storage_of_spent_nuclear_fuel.html

Carter, James, "Nuclear Non-Proliferation Policy (U)," presidential directive NSC-8, March 24, 1977.

Carter, Luther J., Nuclear Imperatives and Public Trust: Dealing with Radioactive Waste, Washington, D.C.: Resources for the Future, 1987.

Carter, Luther J., and Thomas H. Pigford, "The World's Growing Inventory of Civil Spent Fuel," Arms Control Today, January–February 1999, pp. 8–14. As of October 11, 2010: http://www.armscontrol.org/act/1999_01-02/carjf99

Chow, Brian G., and Gregory S. Jones, Managing Waste with and Without Plutonium Separation, Santa Monica, Calif.: RAND Corporation, P-8035, 1999. As of October 11, 2010: http://www.rand.org/pubs/papers/P8035/

Code of Federal Regulations, Title 40, Protection of Environment, Chapter I, Environmental Protection Agency, Part 197, Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for Yucca Mountain, Nevada.

Cotton, T., personal communication to authors, July 16, 2010.

Davis, Mary Byrd, The La Hague Reprocessing Plant: Basic Facts—Infrastructure, Contracts, and Products, Lexington, Ky.: EcoPerspectives, October 2009. As of October 11, 2010: http://www.earthisland.org/ecoperspectives/haguebasic.pdf

EIA—See U.S. Energy Information Administration.

Environmental Protection Agency, "Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for Yucca Mountain, Nevada: Final Rule," Federal Register, Vol. 73, No. 200, October 15, 2008, pp. 61256–61289. As of October 12, 2010: http://www.epa.gov/ rpdweb00/yucca/

EPA—See Environmental Protection Agency.

Ewing, Rodney, Clifford E. Singer, and Paul P. H. Wilson, "Plan D" for Spent Nuclear Fuel, Matthew A. Rosenstein and William R. Roy, eds., Champaign, Ill.: Program in Arms Control, Disarmament, and International Security, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2009. As of October 11, 2010: http://acdis.illinois.edu/publications/207/ publication-PlanDforSpentNuclearFuel.html

Farsetta, Diane, Wisconsin's Balance of Power: The Campaign to Repeal the Nuclear Moratorium, Center for Media and Democracy, March 26, 2009. As of October 20, 2010: http://www.prwatch.org/node/8291

GAO—See U.S. General Accounting Office (before 2004) or U.S. Government Accountability Office (since 2004).

Garvey, Todd, The Yucca Mountain Litigation: Breach of Contract Under the Nuclear Waste Policy Act of 1982, Washington, D.C.: Congressional Research Service, R40996, December 22, 2009. As of October 11, 2010: http://ncseonline.org/nle/crs/abstract.cfm? NLEid=2249

Gillette, Robert, "'Transient' Nuclear Workers: A Special Case for Standards," Science, Vol. 186, No. 4159, October 11, 1974, pp. 125–129.

Grubert, Denise, and Dalia Patiño-Echeverri, Nuclear Reprocessing in the United States: A Levelized Cost Analysis, Durham, N.C.: Duke University, masters project, August 2009. As of October 11, 2010: http://dukespace.lib.duke.edu/dspace/handle/ 10161/1370

Guinn, Kenny C., Statement of Reasons Supporting the Governor of Nevada's Notice of Disapproval of the Proposed Yucca Mountain Project, April 8, 2002. As of October 20, 2010: http://www.yuccamountain.org/pdf/govveto0402.pdf

Holt, Mark, Civilian Nuclear Spent Fuel Temporary Storage Options, Washington, D.C.: Congressional Research Service, March 27, 1998.

———, Advanced Nuclear Power and Fuel Cycle Technologies: Outlook and Policy Options, Washington, D.C.: Congressional Research Service, report for Congress RL34579, July 11, 2008. As of October 11, 2010: http://opencrs.com/document/ RL34579

———, Nuclear Waste Disposal: Alternatives to Yucca Mountain, Washington, D.C.: Congressional Research Service, report for Congress R40202, February 6, 2009a. As of October 11, 2010: http://opencrs.com/document/R40202

———, Nuclear Energy Policy, Washington, D.C.: Congressional Research Service, RL33558, December 10, 2009b. As of October 11, 2010: http://handle.dtic.mil/100.2/ADA513533

———, Civilian Nuclear Waste Disposal, Washington, D.C.: Congressional Research Service, RL33461, July 16, 2010. As of October 11, 2010:http://ncseonline.org/NLE/crs/abstract.cfm?NLEid=1670

IAEA—See International Atomic Energy Agency.

IFNEC—See International Framework for Nuclear Energy Cooperation.

Interagency Review Group on Nuclear Waste Management, Report to the President, Washington, D.C., 1979.

International Atomic Energy Agency, Survey of Wet and Dry Spent Fuel Storage, Vienna, Austria, IAEA-TECDOC-1100, July 1999. As of October 11, 2010: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1100_prn.pdf

———, The Use of Scientific and Technical Results from Underground Research Laboratory Investigations for the Geological Disposal of Radioactive Waste, Vienna, Austria, IAEA-TECDOC-1243, September 2001. As of October 11, 2010: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1243_prn.pdf

———, Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes, Vienna, Austria, technical report series 413, February 2003. As of October 11, 2010:
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS413_web.pdf

———, Status and Trends in Spent Fuel Reprocessing, Vienna, Austria, IAEA-TECDOC-1467, September 2005. As of October 11, 2010: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1467_web.pdf

——, Management of Reprocessed Uranium: Current Status and Future Prospects, Vienna, Austria, IAEA-TECDOC-1529, February 2007a. As of October 11, 2010: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1529_web.pdf

———, Factors Affecting Public and Political Acceptance for the Implementation of Geological Disposal, Vienna, Austria, IAEA-TECDOC-1566, October 2007b. As of October 11, 2010: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1566_web.pdf

———, Nuclear Power Reactors in the World, 2009 Edition, Vienna, Austria, reference data series 2, July 2009a. As of October 11, 2010: http://www-pub.iaea. org/MTCD/publications/PDF/RDS2-29_web.pdf

———, Use of Reprocessed Uranium: Challenges and Options, Vienna, Austria, nuclear energy series NF-T-4.4, December 2009b. As of October 11, 2010: http://www-pub.iaea. org/MTCD/publications/PDF/Pub1411_web.pdf

International Framework for Nuclear Energy Cooperation, "Steering Group Action Plan: An Action Plan for the Safe, Secure Global Use of Nuclear Energy, Revised Action

Plan Adopted June 17, 2010," June 17, 2010. As of October 20, 2010: http://www.gneppartnership.org/docs/ACTIONPLAN_June2010.pdf

IRG—See Interagency Review Group on Nuclear Waste Management.

Jackson, David P., Status of Nuclear Fuel Reprocessing, Partitioning and Transmutation, Toronto, Ont.: Nuclear Waste Management Organization, technical methods 6-4, 2003. As of October 11, 2010: http://www.nwmo.ca/6.4

La Porte, Todd R., and Daniel S. Metlay, "Hazards and Institutional Trustworthiness: Facing a Deficit of Trust," Public Administration Review, Vol. 56, No. 4, July–August 1996, pp. 341–347.

Macfarlane, Allison, "Interim Storage of Spent Fuel in the United States," Annual Review of Energy and the Environment, Vol. 26, 2001, pp. 201–235.

Mark, J. Carson, Reactor-Grade Plutonium's Explosive Properties, Washington, D.C.: Nuclear Control Institute, 1990. As of October 11, 2010: http://www.nci.org/NEW/NT/ rgpu-mark- 90.pdf

Massachusetts Institute of Technology, The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study, Boston, Mass., 2003. As of October 11, 2010: http://web.mit.edu/nuclearpower/

———, The Future of the Nuclear Fuel Cycle: An Interdisciplinary MIT Study—Summary Report, 2010. As of October 11, 2010: http://web.mit.edu/mitei/docs/spotlights/nuclear-fuel-cycle.pdf

McCullum, Rod, Nuclear Energy Institute, "Integrated Used Fuel Management: Industry Perspectives," briefing delivered to the Nuclear Waste Technical Review Board, Las Vegas, Nev., June 11, 2009. As of October 11, 2010: http://www.nwtrb.gov/meetings/2009/june/mccullum.pdf

Meserve, Richard A., chair, U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Nuclear Safety and Public Acceptance in the United States," remarks, 2000 American Nuclear Society/European Nuclear Society International Meeting, November 13, 2000a. As of October 12, 2010: http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/speeches/2000/s00-27.html

———, "Responsible Openness: An Imperative for the U.S. Nuclear Regulatory Commission," Nuclear Energy Agency conference, Paris, November 29, 2000b. As of October 12, 2010: http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/speeches/2000/s00-28.pdf

MIT—See Massachusetts Institute of Technology.

Monitored Retrievable Storage Review Commission, Nuclear Waste: Is There a Need for Federal Interim Storage? Washington, D.C., November 1, 1989.

Murphy, Bill, "Sandia to Help NRC License New Generation of Nuclear Power Plants," Sandia Lab News, Vol. 58, No. 23, November 9, 2007. As of October 11, 2010: http://www.sandia.gov/LabNews/071109.html

National Academy of Sciences, Committee on International Security and Arms Control, Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium, Washington, D.C., National Academy Press, 1994.

National Research Council, Committee on Waste Disposal, The Disposal of Radioactive Waste on Land, Washington, D.C.: National Academy of Sciences, 1957.

———, Board on Radioactive Waste Management, Rethinking High-Level Radioactive Waste Disposal: A Position Statement of the Board on Radioactive Waste Management, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council, Washington, D.C.: National Academy Press, 1990.

———, Committee on Technical Bases for Yucca Mountain Standards, Technical Bases for Yucca Mountain Standards, Washington, D.C.: National Academy Press, 1995. As of October 11, 2010: http://www.nap.edu/catalog/4943.html

———, Committee on Separations Technology and Transmutation Systems, Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutation, Washington, D.C.: National Academy Press, 1996.

———, Committee on Disposition of High-Level Radioactive Waste Through Geological Isolation, Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges, Washington, D.C.: National Academy Press, 2001. As of October 11, 2010: http://books.nap.edu/books/0309073170/html/index.html

———, Committee on Principles and Operational Strategies for Staged Repository Systems, One Step at a Time: The Staged Development of Geologic Repositories for High-Level Radioactive Waste, Washington, D.C.: National Academies Press, 2003.

———, Nuclear and Radiation Studies Board, Transportation Research Board, Going the Distance? The Safe Transport of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste in the United States, Washington, D.C.: National Academies Press, 2006. As of October 11, 2010: http://www.nap.edu/catalog/11538.html

NEA—See Organisation for Economic Co-Operation and Development Nuclear Energy Agency.

Nevada Office of the Attorney General, comments on the U.S. Department of Energy National Nuclear Security Administration notice of intent to prepare an environmental-impact statement for the continued operation of the Nevada test site and off-site locations in the state of Nevada, October 16, 2009. As of October 12, 2010: http://www.state.nv.us/nucwaste/news2009/pdf/nvag091014nnsa.pdf

Normile, Dennis, "Will Monju's Resurrection Give Breeders a Second Lease on Life?" Science, Vol. 323, No. 5918, February 27, 2009, p. 1167.

NRC—See Nuclear Regulatory Commission.

Nuclear Energy Institute, "Nuclear Waste Disposal: Industry Supports Integrated Used Fuel Management Strategy," April 2010. As of October 11, 2010: http://www.nei.org/resourcesandstats/documentlibrary/nuclearwastedisposal/policybrief/industry-supports-integrated-used-fuel-management-strategy

Nuclear Energy Institute v. Environmental Protection Agency, 373 F.3d 1251, D.C. Circuit, July 9, 2004.

Nuclear Energy Study Group of the American Physical Society, Consolidated Interim Storage of Commercial Spent Nuclear Fuel: A Technical and Programmatic Assessment, February 2007. As of October 11, 2010: http://www.aps.org/ policy/reports/popa-reports/upload/Energy-2007-Report-InterimStorage.pdf

Nuclear Regulatory Commission, "Rulemaking on the Storage and Disposal of Nuclear Waste (Waste Confidence Rulemaking)," Federal Register, Vol. 44, August 22, 1984, p. 61372.

———, "Waste Confidence Decision Review," Federal Register, Vol. 55, September 18, 1990, p. 38508.

———, "Requirements for the Physical Protection of Stored Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste," Code of Federal Regulations, Vol. 10, Ch. 1, Section 73.51, January 1, 2004. As of October 12, 2010: http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part073/part073-0051.html

———, "Fact Sheet on Storage of Spent Nuclear Fuel," April 2005. As of October 12, 2010: http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/storage-spent-fuel-fs.html

———, "DOE Projected Schedule for Licensing a Geologic Repository," June 24, 2008a. As of October 12, 2010: http://www.nrc.gov/waste/hlw-disposal/licensing/schedule-lic-geo-repository.html

———, "Waste Confidence Decision Update," Federal Register, Vol. 73, No. 197, October 9, 2008b, pp. 59552–59570. As of October 12, 2010: http://edocket.access.gpo.gov /2008/pdf/E8-23381.pdf

———, "About NRC," June 17, 2010a. As of October 12, 2010: http://www.nrc.gov/about-nrc.html

———, "Locations of Independent Spent Fuel Storage Installations," August 26, 2010b. As of October 12, 2010: http://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/locations.html

Nuclear Waste Project Office, State of Nevada, Office of the Governor, Agency for Nuclear Projects, "Why Does the State Oppose Yucca Mountain?" posted February 4, 1998. As of October 20, 2010: http://www.state.nv.us/nucwaste/yucca/state01.htm

NWPA—See Public Law 97-425.

NWTRB—See U.S. Nuclear Waste Technical Review Board.

Office of Technology Assessment, Managing the Nation's Commercial High-Level Radioactive Waste, Washington, D.C.: U.S. Congress, OTA-O-171, March 1985.

Organisation for Economic Co-Operation and Development Nuclear Energy Agency, The Regulatory Challenges of Decommissioning Nuclear Reactors, Paris, 2003. As of October 11, 2010: http://www.sourceoecd.org/9789264103474

———, Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management, Paris, 5990, 2006.

———, Strategic and Policy Issues Raised by the Transition from Thermal to Fast Nuclear Systems, Paris, 6246, April 2009a. As of October 11, 2010: http://www.sourceoecd.org/ 9789264060647

———, Nuclear Energy Data, Paris, nuclear development 6816, September 2009b. As of October 11, 2010: http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10333330

Pollack, Andrew, "Reactor Accident in Japan Imperils Energy Program," New York Times, February 24, 1996. As of October 11, 2010: http://www.nytimes.com/1996/02/24/world/reactor-accident-in-japan-imperils-energy-program.html?pagewanted=all

Public Law 91-190, National Environmental Policy Act of 1969, January 1, 1970.

Public Law 93-523, Safe Drinking Water Act, December 16, 1974.

Public Law 97-425, Nuclear Waste Policy Act of 1982, January 7, 1983.

Public Law 100-202, a joint resolution making further continuing appropriations for the fiscal year 1988, and for other purposes, December 22, 1987.

Public Law 100-203, Omnibus Budget Reconciliation Act, December 22, 1987.

Public Law 102-486, Energy Policy Act, October 24, 1992.

Reid, Harry, senator, "Issues: Yucca Mountain," undated web page. As of October 12, 2010: http://reid.senate.gov/issues/yucca.cfm

Schneider, E. A., M. R. Deinert, and K. B. Cady, "Cost Analysis of the US Spent Nuclear Fuel Reprocessing Facility," Energy Economics, Vol. 31, No. 5, September 2009, pp. 627–634.

Schneider, Mycle, and Yves Marignac, Spent Nuclear Fuel Reprocessing in France, Princeton, N.J.: International Panel on Fissile Materials, April 2008. As of October 11, 2010: http://www.fissilematerials.org/ipfm/site_down/rr04.pdf

Stewart, Richard B. "U.S. Nuclear Waste Law and Policy: Fixing a Bankrupt System," N.Y.U. Environmental Law Journal, Vol. 17, pp. 783–825, 2008. As of October 11, 2010: http://www1.law.nyu.edu/journals/envtllaw/issues/vol17/Stewart%20Macro.pdf

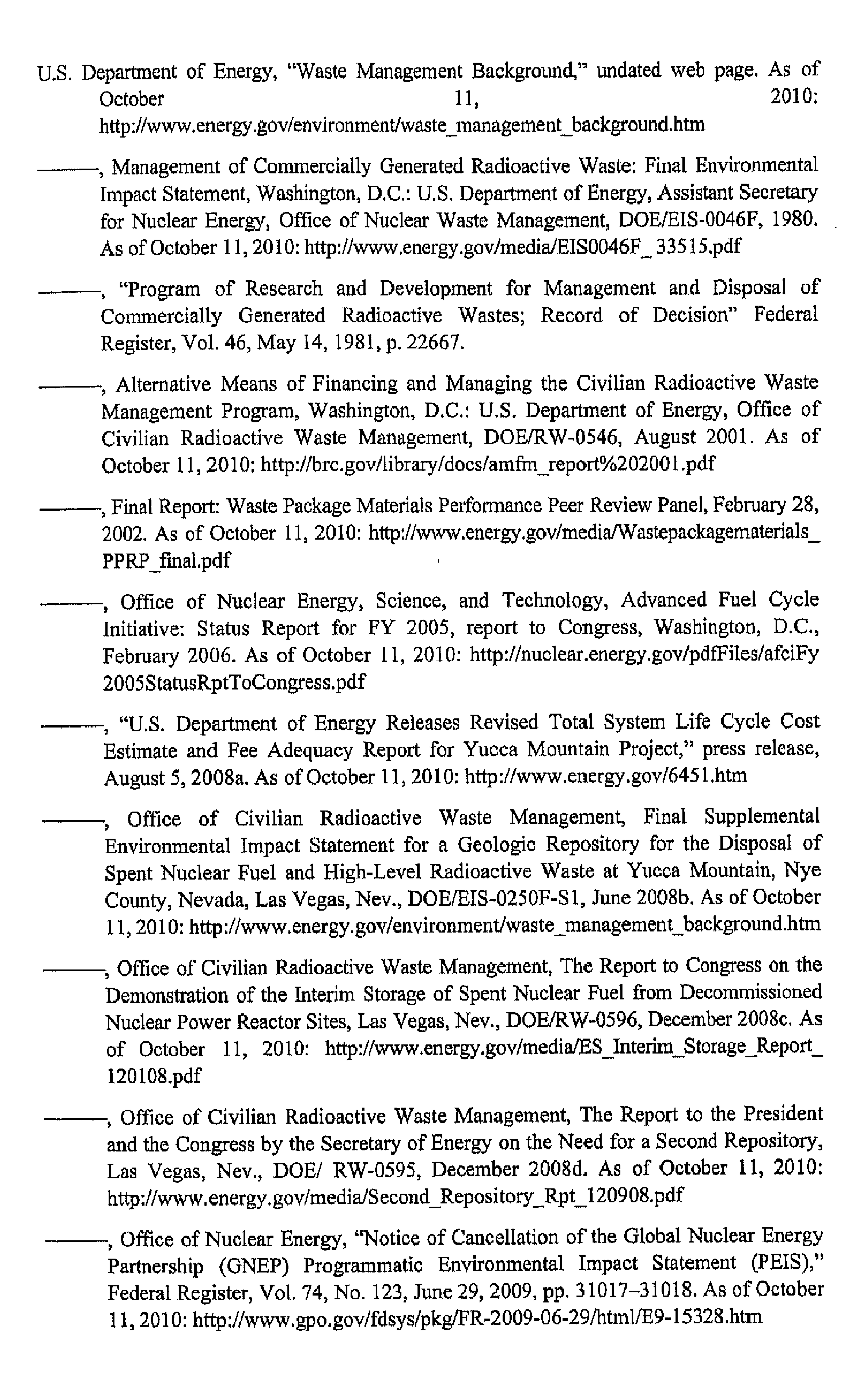
Union of Concerned Scientists, "Spent Reactor Fuel Security," undated. As of October 12, 2010: http://www.ucsusa.org/nuclear_power/nuclear_power_risk/sabotage_and_attacks_on_reactors/ spent-reactor-fuel-security.html

———, "A Brief History of Reprocessing and Cleanup in West Valley, NY," March 3, 2008. As of October 12, 2010: http://www.ucsusa.org/nuclear_power/nuclear_power_risk/ nuclear_proliferation_and_terrorism/ a-brief-history-of.html

"URS-Led Team Selected to Manage Yucca Mountain Project," BusinessWire, October 30, 2008. As of October 12, 2010: http://www.businesswire.com/news/home/20081030006646/en/URS-Led-Team-Selected-Manage-Yucca-Mountain-Project

U.S. Atomic Energy Commission, Office of Planning and Analysis, Nuclear Power 1973–2000, Washington, D.C., 1972.

U.S. Congress Office of Technology Assessment, "Technical Aspects of Nuclear Proliferation," Technologies Underlying Weapons of Mass Destruction, Washington, D.C., OTA-BP-ISC-115, December 1993. As of October 11, 2010: http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS28664



U.S. Department of Energy, "Waste Management Background," undated web page. As of October 11, 2010: http://www.energy.gov/environment/waste_management_background.htm

———, Management of Commercially Generated Radioactive Waste: Final Environmental Impact Statement, Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, Assistant Secretary for Nuclear Energy, Office of Nuclear Waste Management, DOE/EIS-0046F, 1980. As of October 11, 2010: http://www.energy.gov/media/EIS0046F_33515.pdf

———, "Program of Research and Development for Management and Disposal of Commercially Generated Radioactive Wastes; Record of Decision" Federal Register, Vol. 46, May 14, 1981, p. 22667.

———, Alternative Means of Financing and Managing the Civilian Radioactive Waste Management Program, Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management, DOE/RW-0546, August 2001. As of October 11, 2010: http://brc.gov/library/docs/amfm_report%202001.pdf

———, Final Report: Waste Package Materials Performance Peer Review Panel, February 28, 2002. As of October 11, 2010: http://www.energy.gov/media/Wastepackagematerials_PPRP_final.pdf

———, Office of Nuclear Energy, Science, and Technology, Advanced Fuel Cycle Initiative: Status Report for FY 2005, report to Congress, Washington, D.C., February 2006. As of October 11, 2010: http://nuclear.energy.gov/pdfFiles/afciFy2005StatusRptToCongress.pdf

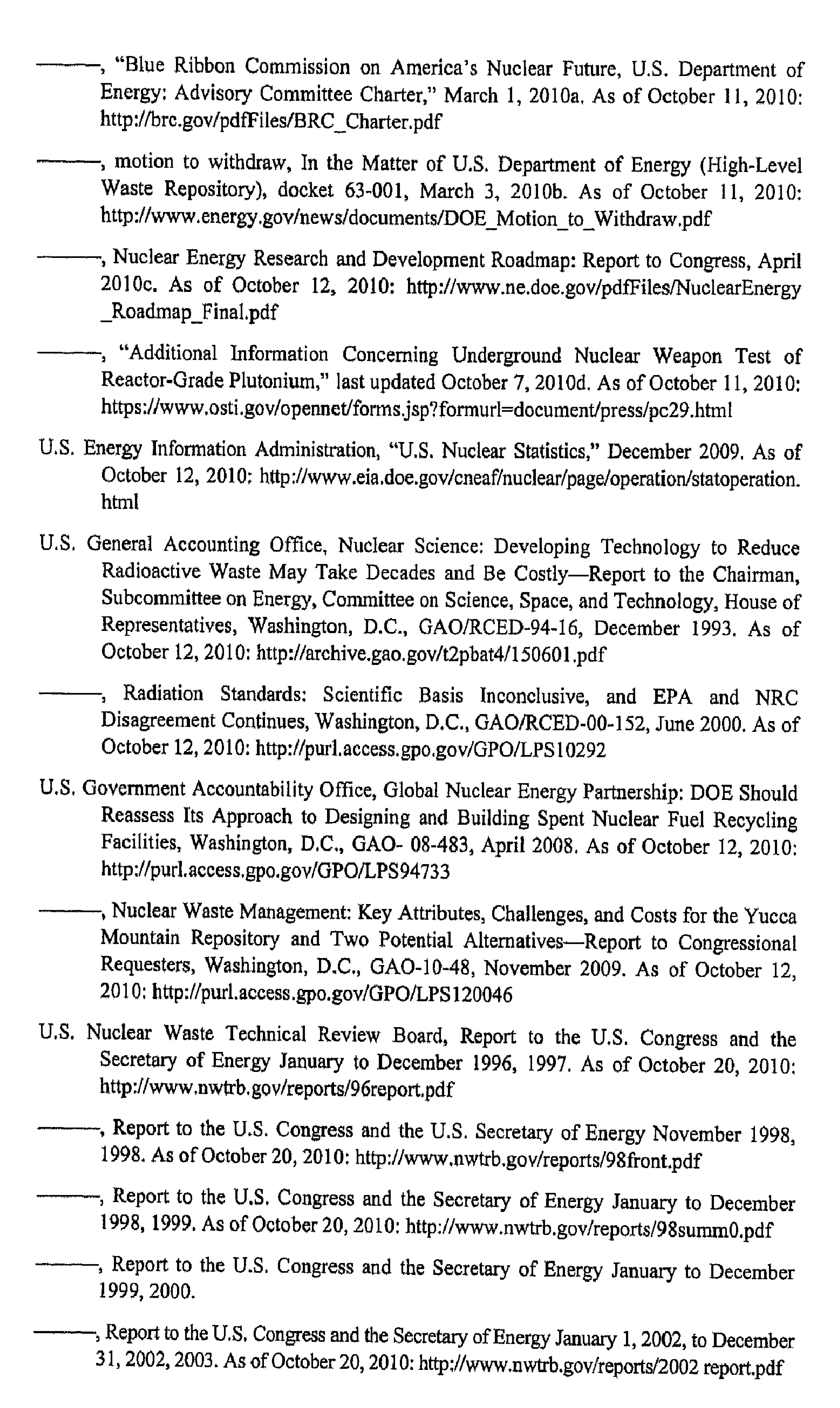
———, "U.S. Department of Energy Releases Revised Total System Life Cycle Cost Estimate and Fee Adequacy Report for Yucca Mountain Project," press release, August 5, 2008a. As of October 11, 2010: http://www.energy.gov/6451.htm

———, Office of Civilian Radioactive Waste Management, Final Supplemental Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada, Las Vegas, Nev., DOE/EIS-0250F-S1, June 2008b. As of October 11, 2010: http://www.energy.gov/environment/waste_management_background.htm

———, Office of Civilian Radioactive Waste Management, The Report to Congress on the Demonstration of the Interim Storage of Spent Nuclear Fuel from Decommissioned Nuclear Power Reactor Sites, Las Vegas, Nev., DOE/RW-0596, December 2008c. As of October 11, 2010: http://www.energy.gov/media/ES_Interim_Storage_Report_120108.pdf

———, Office of Civilian Radioactive Waste Management, The Report to the President and the Congress by the Secretary of Energy on the Need for a Second Repository, Las Vegas, Nev., DOE/ RW-0595, December 2008d. As of October 11, 2010: http://www.energy.gov/media/Second_Repository_Rpt_120908.pdf

———, Office of Nuclear Energy, "Notice of Cancellation of the Global Nuclear Energy Partnership (GNEP) Programmatic Environmental Impact Statement (PEIS)," Federal Register, Vol. 74, No. 123, June 29, 2009, pp. 31017–31018. As of October 11, 2010: http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2009-06-29/html/E9-15328.htm



———, "Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, U.S. Department of Energy: Advisory Committee Charter," March 1, 2010a. As of October 11, 2010: http://brc.gov/pdfFiles/BRC_Charter.pdf

———, motion to withdraw, In the Matter of U.S. Department of Energy (High-Level Waste Repository), docket 63-001, March 3, 2010b. As of October 11, 2010: http://www.energy.gov/news/documents/DOE_Motion_to_Withdraw.pdf

———, Nuclear Energy Research and Development Roadmap: Report to Congress, April 2010c. As of October 12, 2010: http://www.ne.doe.gov/pdfFiles/NuclearEnergy_Roadmap_Final.pdf

———, "Additional Information Concerning Underground Nuclear Weapon Test of Reactor-Grade Plutonium," last updated October 7, 2010d. As of October 11, 2010: https://www.osti.gov/opennet/forms.jsp?formurl=document/press/pc29.html

U.S. Energy Information Administration, "U.S. Nuclear Statistics," December 2009. As of October 12, 2010: http://www.eia.doe.gov/cneaf/nuclear/page/operation/statoperation.html

U.S. General Accounting Office, Nuclear Science: Developing Technology to Reduce Radioactive Waste May Take Decades and Be Costly—Report to the Chairman, Subcommittee on Energy, Committee on Science, Space, and Technology, House of Representatives, Washington, D.C., GAO/RCED-94-16, December 1993. As of October 12, 2010: http://archive.gao.gov/t2pbat4/150601.pdf

———, Radiation Standards: Scientific Basis Inconclusive, and EPA and NRC Disagreement Continues, Washington, D.C., GAO/RCED-00-152, June 2000. As of October 12, 2010: http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS10292

U.S. Government Accountability Office, Global Nuclear Energy Partnership: DOE Should Reassess Its Approach to Designing and Building Spent Nuclear Fuel Recycling Facilities, Washington, D.C., GAO- 08-483, April 2008. As of October 12, 2010: http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS94733

———, Nuclear Waste Management: Key Attributes, Challenges, and Costs for the Yucca Mountain Repository and Two Potential Alternatives—Report to Congressional Requesters, Washington, D.C., GAO-10-48, November 2009. As of October 12, 2010: http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS120046

U.S. Nuclear Waste Technical Review Board, Report to the U.S. Congress and the Secretary of Energy January to December 1996, 1997. As of October 20, 2010: http://www.nwtrb.gov/reports/96report.pdf

———, Report to the U.S. Congress and the U.S. Secretary of Energy November 1998, 1998. As of October 20, 2010: http://www.nwtrb.gov/reports/98front.pdf

———, Report to the U.S. Congress and the Secretary of Energy January to December 1998, 1999. As of October 20, 2010: http://www.nwtrb.gov/reports/98summ0.pdf

———, Report to the U.S. Congress and the Secretary of Energy January to December 1999, 2000.

———, Report to the U.S. Congress and the Secretary of Energy January 1, 2002, to December 31, 2002, 2003. As of October 20, 2010: http://www.nwtrb.gov/reports/2002 report.pdf

———, Report to the U.S. Congress and the Secretary of Energy March 1, 2006–December 31, 2007, 2008. As of October 20, 2010: http://www.nwtrb.gov/reports/2007 report.pdf

U.S. Senate, Committee on Energy and Natural Resources, Approval of Yucca Mountain Site: Report (to accompany S.J. Res 34), Washington, D.C., Senate report 107-159, June 10, 2002. As of October 12, 2010: http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS20294

West Valley Environmental Services and URS Corporation Washington Division, West Valley Demonstration Project Annual Site Environmental Report for Calendar Year 2008, West Valley, N.Y., September 2009. As of October 12, 2010: http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/964602-KcroWb/964602.pdf

قواعد النشر

أولاً: القواعد العامة

1. تقبل للنشر في هذه السلسلة البحوث المترجمة من اللغات الأجنبية المختلفة، وكذلك الدراسات التي يكتبها سياسيون وكتاب عالميون.

2. يُشترط أن يكون البحث المترجم أو الدراسة في موضوع يدخل ضمن اهتمامات المركز.

3. يشترط ألا يكون قد سبق نشر الدراسة أو نشر ترجمتها في جهات أخرى.

4. تصبح الدراسات والبحوث المنشورة في هذه السلسلة ملكاً لمركز الإمارات للدراسات والبحوث الاستراتيجية، ولا يحق للمترجم أو المؤلف إعادة نشرها في مكان آخر.

5. يتولى المركز إجراءات الحصول على موافقة الناشرين الأصليين للبحوث المترجمة.

ثانياً: إجراءات النشر

1. تقدم الدراسة أو الترجمة مطبوعة من نسخة واحدة.

2. ترفق مع الترجمة صورة من المقالة باللغة المترجم عنها، وبيانات عن المصدر الذي أخذت منه.

3. يرسل مع البحث أو الترجمة بيان موجز بالسيرة العلمية للمترجم أو للباحث.

4. تقوم هيئة التحرير بمراجعة البحث أو الترجمة للتأكد من مستواهما، من خلال مراجعين من ذوي الاختصاص.

5. يخطر الباحث أو المترجم بنتيجة المراجعة خلال ثلاثة أشهر من تاريخ تسلم البحث.

6. تتولى هيئة التحرير المراجعة اللغوية وتعديل المصطلحات بما لا يخل بمضمون البحث أو الترجمة.

صدر من سلسلة «دراسات عالمية»

	العنوان	المؤلف
1.	نحو شرق أوسط جديد، إعادة النظر في المسألة النووية	أفنر كوهين
2.	السيطرة على الفضاء في حرب الخليج الثانية وما بعدها	ستيفن لمباكيس
3.	النزاع في طاجكستان، التفاعل بين التمزق الداخلي والمؤثرات الخارجية (1991 - 1994)	جوليان ثوني
4.	حرب الخليج الثانية، التكاليف والمساهمات المالية للحلفاء	ستيفن داجت جاري جي. باجليانو
5.	رأس المال الاجتماعي والاقتصاد العالمي	فرانسيس فوكوياما
6.	القدرات العسكرية الإيرانية	أنتوني كوردزمان
7.	برامج الخصخصة في العالم العربي	هارفي فيجنباوم وجفري هينج وبول ستيفنز
8.	الجزائر بين الطريق المسدود والحل الأمثل	هيو روبرتس
9.	المشاكل القومية والعرقية في باكستان	أبها دكسيت
10.	المناخ الأمني في شرق آسيا	سنجانا جوشي
11.	الإصلاح الاقتصادي في الصين ودلالاته السياسية	وي وي زانج
12.	السياسة الدولية في شمال شرق آسيا... المثلث الاستراتيجي: الصين - اليابان - الولايات المتحدة الأمريكية	توماس ويلبورن
13.	رؤية استراتيجية عامة للأوضاع العالمية	إعداد: إيرل تيلفورد
14.	العراق في العقد المقبل: هل سيقوى على البقاء حتى عام 2002؟	جراهام فولر
15.	السياسة الخارجية الأمريكية بعد انتهاء الحرب الباردة	دانيال وارنر
16.	التنمية الصناعية المستديمة	ديفيد والاس
17.	التحولات في الشرق الأوسط وشمال إفريقيا: التحديات والاحتمالات أمام أوربا وشركائها	فيرنر فاينفلد ويوزيف يانج وسفن بيرنيد
18.	جدلية الصراعات العرقية ومشاريع النفط في القوقاز	فيكن تشيتريان
19.	العلاقات الدفاعية والأمنية بين إنجلترا وألمانيا «نظرة تقويمية»	إدوارد فوستر وبيتر شميت

صدر من سلسلة «دراسات عالمية»

	العنوان	المؤلف
20.	اقتصادات الخليج: استراتيجيات النمو في القرن الحادي والعشرين	تحرير: جوليا ديفلين
21.	القيم الإسلامية والقيم الغربية	علي الأمين المزروعي
22.	الشراكة الأوربية – المتوسطية: إطار برشلونة	آر. كيه. رامازاني
23.	رؤية استراتيجية عامة للأوضاع العالمية (2)	إعداد: إيرل تيلفورد
24.	النظرة الآسيوية نحو دول الخليج العربية	كيه. إس. بلاكريشنان جوليوس سيزار بارينياس جاسجيت سنج فيلوثفار كاناجا راجان
25.	سياسة أوربا الخارجية غير المشتركة	فيليب جوردون
26.	سياسة الردع والصراعات الإقليمية المطامح والمغالطات والخيارات الثابتة	كولن جراي
27.	الجرأة والحذر في سياسة تركيا الخارجية	مالك مفتي
28.	العولمة الناقصة: التفكك الإقليمي والليبرالية السلطوية في الشرق الأوسط	يزيد صايغ
29.	العلاقات التركية – الإسرائيلية من منظور الجدل حول الهوية التركية	م. هاكان يافوز
30.	الثورة في الشؤون الاستراتيجية	لورنس فريدمان
31.	الهيمنة السريعة: ثورة حقيقية في الشؤون العسكرية التقنيات والأنظمة المستخدمة لتحقيق عنصري الصدمة والترويع	هارلان أولمان وجيمس بي. ويد
32.	التيارات السياسية في إيران 1981 – 1997	تأليف: سعيد برزين ترجمة: علاء الرضائي
33.	اتفاقيات المياه في أوسلو 2: تفادي كارثة وشيكة	ألوين روير
34.	السياسة الاقتصادية والمؤسسات والنمو الاقتصادي في عصر العولمة	تيرنس كاسي

صدر من سلسلة «دراسات عالمية»

الرقم	العنوان	المؤلف
35.	دولة الإمارات العربية المتحدة الوطنية والهوية العربية - الإسلامية	سالي فندلو
36.	استقرار عالم القطب الواحد	وليم وولفورث
37.	النظام العسكري والسياسي في باكستان	تأليف: إيزابيل كوردونير ترجمة: عبدالله جمعة الحاج
38.	إيران بين الخليج العربي وحوض بحر قزوين الانعكاسات الاستراتيجية والاقتصادية	شيرين هنتر
39.	برنامج التسلح النووي الباكستاني نقاط التحول والخيارات النووية	سمينة أحمد
40.	تدخل حلف شمال الأطلسي في كوسوفا	ترجمة: الطاهر بوساحية
41.	الاحتواء المزدوج وما وراءه: تأملات في الفكر الاستراتيجي الأمريكي	عمرو ثابت
42.	الصراع الوطني الممتد والتغير في الخصوبة: الفلسطينيون والإسرائيليون في القرن العشرين	فيليب فرج
43.	مفاوضات السلام وديناميكية الصراع العربي - الإسرائيلي	عمرو جمال الدين ثابت
44.	نفط الخليج العربي: الإنتاج والأسعار حتى عام 2020	ديرموت جيتلي
45.	انهيار العملية السلمية الفلسطينية - الإسرائيلية: أين الخلل؟	جيروم سليتر
46.	ثورة المعلومات والأمن القومي	تحرير: توماس كوبلاند
47.	القانون الدولي والحرب ضد الإرهاب	كريستوفر جرينوود
48.	إيران والعراق	تشاس فريمان (الابن) وآخرون
49.	إصلاح أنظمة حقوق الملكية الفكرية في الدول النامية: الانعكاسات والسياسات	طارق علما ومايا كنعان
50.	الأسطورة الخضراء: النمو الاقتصادي وجودة البيئة	ماريان رادتسكي

صدر من سلسلة «دراسات عالمية»

.51	التصورات العربية لتركيا وانحيازها إلى إسرائيل بين مظالم الأمس ومخاوف اليوم	أوفرا بنجيو وجنسر أوزكان
.52	مستقبل الأيدز: الحصيلة المروعة في روسيا والصين والهند	نيكولاس إيبراشتات
.53	الدور المتغير للمعلومات في الحرب	تحرير: زلمي خليل زاد وجون وايت
.54	مسؤولية الحماية وأزمة العمل الإنساني	جاريث إيفانز ومحمد سحنون وديفيد ريف
.55	الليبرالية وتقويض سيادة الإسلام	عمرو ثابت
.56	الوفاق الهندي - الإسرائيلي	أفرايم إنبار
.57	الفضائيات العربية والسياسة في الشرق الأوسط	محمد زياني
.58	دور تصدير المياه في السياسة الإيرانية الخارجية تجاه مجلس التعاون لدول الخليج العربية	كامران تارمي
.59	أهمية النجاح: الحساسية إزاء الإصابات والحرب في العراق	كريستوفر جيلبي وآخران
.60	الفوز مع الحلفاء: القيمة الاستراتيجية للنموذج الأفغاني	ريتشارد أندريس وآخران
.61	الخروج من العراق: استراتيجيات متنافسة	توماس ماتير
.62	آراء من داخل الشبكة: تأثير المواقع الإلكترونية في الاهتمامات السياسية للشبان	آرثر لوبيا وتاشا فيلبوت
.63	دبلوماسية الصين النفطية في إفريقيا	أيان تايلر
.64	التدخل العسكري والأسلحة النووية: حول المبدأ الأمريكي الجديد بشأن استخدام السلاح النووي	هارالد مولر وشتيفاني زونيوس ترجمة: عدنان عباس علي
.65	العقوبات في السياسة الدولية: نظرة على نتائج الدراسات والأبحاث	بيتر رودولف ترجمة: عدنان عباس علي
.66	اللوبي الإسرائيلي والسياسة الخارجية الأمريكية	جون ميرشايمر وستيفن والت

صدر من سلسلة «دراسات عالمية»

العنوان	المؤلف
67. نهوض الهند	جورشاران داس سي. راجا موهان أشتون بي كارتر سوميت جانجولي
68. التكاليف الاقتصادية لحرب العراق	تأليف: ليندا بيلمز جوزيف ستيجليتز ترجمة: عمر عبدالكريم الجميلي
69. إيران النووية: الانعكاسات وطرائق العمل	تأليف: إفرايم كام ترجمة: ثروت محمد حسن
70. حروب الخليج: مراجعات للسياسة الأمريكية تجاه العراق وإيران	جيمس فيرون راي تقيه
71. هل يُكرَّر سيناريو مفاعل تموز؟ تقويم القدرات الإسرائيلية على تدمير المنشآت النووية الإيرانية	ويتني راس و أوستن لونج ترجمة: الطاهر بوساحية
72. رؤيتان للسياسة الخارجية الأمريكية: جمهورية وديمقراطية	رودولف جولياني و جون إدواردز
73. مقاربات غربية للمسلمين في الغرب وللإسلام السياسي	بسول ويلر وروبرت ليكن وستيفن بروك
74. الدولار واليورو هل يحتم العجز الكبير في ميزان الحساب الجاري الأمريكي ارتفاعاً في قيمة اليورو؟	يوناس دوفيرن كارستن باتريك ماير يوآخيم شايده ترجمة: عدنان عباس علي
75. القفزة الكبرى إلى الوراء! تكاليف أزمة الصين البيئية	إليزابيث إكونومي
76. اتفاقيات التجارة الحرة الثنائية في منطقة آسيا - المحيط الهادي: إشكالياتها ونتائجها	هريبرت ديتر ترجمة: عدنان عباس علي

صدر من سلسلة «دراسات عالمية»

العنوان	المؤلف
77. إعادة التفكير في المصلحة القومية واقعية أمريكية من أجل عالم جديد	كوندوليزا رايس
78. الصين المتغيرة: احتمالات الديمقراطية في الداخل والدبلوماسية الجديدة تجاه "الدول المارقة"	جون ثورنتون وستيفاني كلين - ألبراندت وأندرو سمول
79. التوجه الجديد لليبيا	مولفريد بروت - هيجهامر ورونالد بروس سانت جون
80. أزمة الغذاء العالمية	أليكس إيفانز ويواخيم فون براون وآخرون
81. عهد أوباما سياسة أمريكية للشرق الأوسط	ريتشارد هاس ومارتن أنديك ووالتر راسل ميد
82. اللوبي الهندي والاتفاقية النووية الأمريكية - الهندية	جيسون أ. كيرك
83. وقت الإغلاق: التهديد الإيراني لمضيق هرمز	كيتلين تالماج
84. دور حكام الولايات في السياسة الخارجية الأمريكية	صامويل لوكاس ماكميلان
85. الأزمة المالية العالمية	بن ستيل وستيفن دوناواي
86. شرق إفريقيا: الأمن وإرث الهشاشة	جيلبرت خادياجالا
87. المتعاقدون في الحروب	مارك كانسيان وستيفن شونر
88. الثقافة الاستراتيجية الإيرانية والردع النووي	جنيفر كنيبر وأندرو تيريل
89. أمن الطاقة الأوراسية	جفري مانكوف
90. أسلحة الدمار الشامل والأسلحة الصغيرة والخفيفة: فرق عمل تعزيز القدرات الأمنية المتعددة الأطراف	معهد السلام الدولي
91. هل التقسيم حلٌّ للحرب الأهلية؟	نيكولاس سامبانس وجونا شولهوفر-ول
92. الصراعات في أقاليم الصومال	سولومون ديرسو وبيروك مسفين

صدر من سلسلة «دراسات عالمية»

قسيمة اشتراك في سلسلة

«دراسات عالمية»

الاسم : ....

المؤسسة : ....

العنوان : ....

ص. ب : .... المدينة: ....

الرمز البريدي: ....

الدولة : ....

هاتف : .... فاكس: ....

البريد الإلكتروني: ....

بدء الاشتراك: (من العدد: .... إلى العدد: ....)

رسوم الاشتراك*

للأفراد:	220 درهماً	60 دولاراً أمريكياً
للمؤسسات:	440 درهماً	120 دولاراً أمريكياً

- ❑ للاشتراك من داخل الدولة يقبل الدفع النقدي، والشيكات، والحوالات النقدية.
- ❑ للاشتراك من خارج الدولة تقبل فقط الحوالات المصرفية، مع تحمل المشترك تكاليف التحويل.
- ❑ في حالة الحوالة المصرفية، يرجى تحويل قيمة الاشتراك إلى حساب مركز الإمارات للدراسات والبحوث الاستراتيجية رقم 1950050565 ـ بنك أبوظبي الوطني ـ فرع الخالدية. ص. ب: 46175 أبوظبي ـ دولة الإمارات العربية المتحدة.
- ❑ يمكن الاشتراك عبر موقعنا على الإنترنت (www.ecssr.ae) باستعمال بطاقتي الائتمان Visa وMaster Card.

لمزيد من المعلومات حول آلية الاشتراك يرجى الاتصال:

مركز الإمارات للدراسات والبحوث الاستراتيجية

قسم التوزيع والمعارض

ص.ب: 4567 أبوظبي ـ دولة الإمارات العربية المتحدة

هاتف: 4044445(9712) فاكس: 4044443(9712)

البريد الإلكتروني: books@ecssr.ae

الموقع على الإنترنت: http://www.ecssr.ae

* تشمل رسوم الاشتراك الرسوم البريدية، وتغطي تكلفة اثني عشر عدداً من تاريخ بدء الاشتراك.

مركز الإمارات للدراسات والبحوث الاستراتيجية

ص.ب: 4567 - أبوظبي - دولة الإمارات العربية المتحدة

هاتف: 4044541 -2- 971 - فاكس: 4044542 -2- 971

E-mail: pubdis@ecssr.ae

Website: http://www.ecssr.ae

ISSN 1682 - 1211



